

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL SISTEMA DE
LOCALIZACIÓN DE FALTAS POR ONDA VIAJERA
FRENTE A LOS SISTEMAS TRADICIONALES**



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Realizado por: Daniel Fernández González

Dirigido por: David López Cortón

Leganés, 2017

Aprendí a rendir, no a rendirme.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi abuela Mercedes, por enseñarme el sentido de la vida valorando los medios que uno dispone actualmente. Haciéndome entender que mediante el esfuerzo y la constancia cualquier meta que me proponga va a ser superada. Ejemplificando todos y cada uno de los valores que me ha enseñado. En resumen, gracias a la mejor persona de la que puedo estar rodeado.

Por supuesto se lo tengo que agradecer a mi padre, Felipe, y a mi madre, Angelines, ya que sin ellos nunca hubiera podido llegar hasta aquí. Por mostrarme el sacrificio que hay que realizar para conseguir tus objetivos, enseñando que el talento sin esfuerzo no sirve para nada. Por facilitarme todos los medios requeridos en mi día a día, y por darme ánimos y buenos consejos en todos los ámbitos de la vida.

También quiero agradecer de manera muy sincera a mi hermana, Merce, por hacerme ver que el esfuerzo es lo más importante, por preocuparse por mis problemas como si suyos se trataran y siempre confiar en mí para sacar adelante mis metas. Llegarás muy lejos en el mundo laboral, consiguiendo todos tus sueños gracias a tu impresionante esfuerzo.

Quiero agradecer a mis primos, Quique y Álvaro, siendo para mis unos referentes a los que seguir, haciendo que desde pequeño tuviera claro que tenía que estudiar. Por toda su ayuda desinteresada en problemas tanto académicos como personales. Del mismo modo a mis tíos, Carmen y Enrique, por estar siempre preocupándose por mí y mostrarse siempre disponibles para ayudarme de cualquier forma.

A mis grandes amigos, " El Arrastre", los cuales han estado toda la vida a mi lado, confiando en mí y mostrándome que soy capaz de conseguir todo lo que me proponga. Dándome ánimos, cuando son necesarios, y ayudándome siempre que les necesito. Sin vosotros no sería ni la mitad de lo que soy.

Del mismo modo, quiero agradecer a mis amigos de la universidad, " El Dispensa", por todos los buenos momentos pasados a lo largo de estos cuatro años, sin su apoyo y ánimo esto no hubiera sido posible.

Haciendo un agradecimiento especial a Natalia, mi confidente diario, mi fuente de apoyo, gracias a ti he podido sacar este proyecto adelante. Gracias por estar en todo momento a mi lado, devolviéndome la confianza en mí mismo, sacándome una sonrisa y alejándome de la negatividad.

Por último, pero no menos importante, a David, mi tutor, primero por buscar tiempo para poder sacar este proyecto adelante, proponiéndome temas de gran interés en la actualidad. Por enseñarme los conocimientos necesarios para poder elaborar este proyecto.

Resumen

Los métodos de determinación de la distancia de falta basados en onda viajera tienen un gran potencial para convertirse en el procedimiento principal en el cual se base la protección de distancia. En la actualidad, ya están disponibles relés capaces de realizar un disparo por la función de onda viajera, suponiendo un punto de inflexión en este ámbito.

Estos métodos son capaces de transmitir la orden de disparo al interruptor correspondiente en 4 milisegundos tras la aparición de la falta y determinar el punto donde se ha producido la misma, con un error máximo en torno a un 2%, consiguiendo así reducir de manera drástica los costes asociados de la localización de la avería. Por estos factores es un método que requiere de un intenso estudio.

El principal objetivo de este proyecto es demostrar el buen comportamiento de estos métodos, comparándolos con los métodos que actualmente utilizan la gran mayoría de los relés existentes.

En respuesta a los retos citados, este proyecto se presenta como una comparación en la gestión y operación de una línea aérea de alta tensión equipada con relés de protección de distancia basados en los diferentes métodos de onda viajera frente a la misma línea equipada con relés de distancia tradicionales.

Se ha realizado un estudio del fenómeno de onda viajera, explicando qué es, por qué se produce y cuáles son sus principales características. Se han desarrollado los principales métodos de la localización mediante la onda viajera, investigando sobre los algoritmos que utilizan, el proceso a realizar por parte del relé y su nivel de desarrollo en la actualidad. Del mismo modo se ha analizado los métodos tradicionales más importantes en la localización de falta.

Tras la realización del anterior estudio teórico, se realiza un análisis comparativo de las ventajas e inconvenientes de cada uno de los métodos tratados en este proyecto.

Por último, se realiza la simulación de la operación de ambos relés en una línea aérea de alta tensión de 400 kV con una longitud de 80 kilómetros, comparando los resultados obtenidos entre la localización real de la falta y la localización estimada por cada uno de los relés. Se ha querido evaluar el comportamiento de los métodos de onda viajera y el de los métodos tradicionales en dos situaciones completamente diferenciadas. Primero, se estudia cómo afecta el cambio de la resistencia de falta en la determinación de la localización de la misma. Más tarde, se realizará un estudio para ver cómo funcionan ambos métodos variando la localización en la que se produce la falta.

Mediante los resultados obtenidos en estas simulaciones se alcanzan una serie de conclusiones, las cuales verifican el correcto funcionamiento de la protección de distancia por onda viajera. Posicionándolo como el mejor método a tener en cuenta a la hora de instalar este tipo de protección en líneas de nueva construcción o en renovaciones en líneas ya existentes.

Abstract

The travelling wave fault location methods have a great potential to become the main method about distance protection. At present, there are relays which are able to shoot breakers through the travelling wave function; this is a major deeping point.

These methods are able to operate distance elements in 4 milliseconds after the fault appearance and to determine the place where this fault was produced with the estimated error in the range of 2% of the line length; in this way, it is possible to reduce the costs in relation to the fault location drastically. For these reasons, this is a method that requires a major study.

The main aim of this project is to prove the correct operation of these methods, comparing them with the most usual methods used by the existing relays.

As an answer to the mentioned challenges, this project compares the management and operation of an overhead transmission line based on travelling wave distant protection with the same line based on traditional distance protection.

A research about travelling wave phenomenon has been carried out, explaining what it is, why it is produced and which its main characteristics are. The main travelling wave location methods have been developed, investigating about the algorithms used, the process done by the relay and the present development level of these methods. The main traditional fault location methods have also been analyzed.

After the above theory research, we have done a comparative analysis about the advantages and disadvantages of each of the methods seen in this project.

Finally, the simulation of both relays operation is made in a 400kV overhead transmission line which is 80 kilometers long, comparing the obtained results between the real fault location and the estimated fault location for each of the relays. We have wanted to evaluate the performance of the travelling wave methods and the performance of the traditional methods in two completely different situations. Firstly, we have studied how the change in the value of the fault resistance affects the fault location. Then we have done some research in order to notice how both methods work after varying the fault location.

With the obtained results in these simulations we get to some conclusions, which verify the correct operation of the travelling wave distance protection. This is the best method to take into account when we want to install this type of relays in new lines or in the restructuring of existing lines.

ÍNDICE

Agradecimientos	3
Resumen.....	4
Abstract	5
Índice de ilustraciones.....	9
Índice de tablas	12
CAPÍTULO 1→ INTRODUCCIÓN	13
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Objetivo	14
1.3 Espacio socioeconómico	14
1.4 Presupuesto	15
1.5 Marco regulador.....	17
1.6 Estructura del documento.....	18
CAPÍTULO 2→ ONDAS VIAJERAS	20
2.1 Descripción y ecuaciones	20
2.2 Reflexión y refracción.....	22
2.3 Naturaleza de las faltas	26
CAPÍTULO 3→ MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALTA BASADOS EN ONDAS VIAJERAS	28
3.1 Introducción y aspectos generales.....	28
3.2 Análisis del método basado en los dos extremos de la línea.....	29
3.3 Análisis del método basado en un único extremo de la línea.....	31
3.4 Transformada wavelet	34
3.5 Transformación de Clarke	36
3.6 Determinación del tiempo de llegada de la onda viajera al relé	38
3.6.1 Generar una marca de tiempo en el pico de la onda viajera	39
3.6.2 Generar una marca de tiempo en el inicio de la onda viajera	39
3.6.3 Método del diferenciador	40
3.7 Compensación por la dispersión	42
3.8 Compensación secundaria de la longitud del cable	44
CAPÍTULO 4→ MÉTODOS BASADOS EN REGISTRADORES DE EVENTOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALTAS.....	46
4.1 Introducción a los métodos basados en registrados de eventos.....	46
4.2 Transformada de Park	47

4.3	Adquisición de los datos de tensión utilizando los registradores de eventos de ambos extremos	50
4.4	Cálculo de los fasores ortogonales de tensión en un marco de referencia estático. .	50
4.5	Cálculo de los fasores ortogonales de tensión en un marco de referencia rotativo ..	51
4.6	Detección del instante inicial del transitorio	51
4.7	Estimación de la localización de la falta.....	52
CAPÍTULO 5→ MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALTAS.....		54
5.1	Introducción a los métodos tradicionales	54
5.2	Algoritmo de la reactancia simple.....	56
5.3	Algoritmo de Takagi	57
5.3.1	Modificación del algoritmo de Tagaki	58
5.4	Algoritmo de Sceweitzer para líneas cortas.....	59
5.5	Algoritmo de Eriksson	60
5.6	Estudio sobre los métodos tradicionales	62
CAPÍTULO 6→ VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN DE FALTA POR ONDA VIAJERA.....		65
CAPÍTULO 7→ SIMULACIONES		68
7.1	Programas utilizados en la simulación	68
7.2	Sistema a simular	69
7.3	Impedancia y velocidad de propagación de la línea	72
7.4	Realización de cortocircuitos	74
7.5	Actuación de cada uno de los métodos	75
7.5.1	Método de ondas viajeras basado en las corrientes de un único extremo	75
7.5.2	Método de ondas viajeras basado en las corrientes de ambos extremos	77
7.5.3	Método tradicional	78
7.6	Escenarios a simular	80
7.6.1	Variación de la resistencia de falta	80
7.6.1.1	Caso 1.....	80
7.6.1.2	Caso 2	86
7.6.1.3	Caso 3.....	89
7.6.2	Variación de la localización de la falta.....	93
7.6.2.1	Caso 4.....	93
7.6.2.2	Caso 5.....	96
7.6.2.3	Caso 6.....	98

7.6.2.4 Caso 7.....	101
7.6.2.5 Caso 8.....	104
7.6.2.6 Caso 9.....	106
CAPÍTULO 8→ CONCLUSIONES	110
8.1 Trabajos futuros	113
Bibliografía	114
ANEXO I→ SINCRONIZACIÓN DEL TIEMPO.	116
ANEXO II→ DISPOSICIÓN DE LOS CONDUCTORES.....	122
ANEXO III→CÓDIGO DE MATLAB.	126

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Modelo Π de una línea de transmisión	20
Ilustración 2: Tensiones y corrientes de la onda al atravesar un punto de discontinuidad	23
Ilustración 3: Propagación de una onda viajera en una discontinuidad	25
Ilustración 4: Evolución de la corriente de la onda viajera producida por una falta debido a un fallo en el aislamiento	26
Ilustración 5: Evolución de las corrientes de fase para una falta monofásica a tierra debido al impacto de un rayo en el hilo de guarda	27
Ilustración 6: Respuesta de un transformador de tensión capacitivo	28
Ilustración 7: Respuesta de un transformador de corriente	29
Ilustración 8: Principio de operación para detección de falta utilizando un tiempo común de referencia	30
Ilustración 9: Esquema de comunicación entre relés	30
Ilustración 10: Diagrama de bloques del relé	30
Ilustración 11: Diagrama de Lattice en caso de una falta en un punto m	31
Ilustración 12: Diagrama de Lattice para una línea unida por uno de sus extremos a una línea corta	32
Ilustración 13: Separación de componentes de alta y baja frecuencia, (a) muestreo completo y (b) muestreo reducido	34
Ilustración 14: Gráfica de la resolución en el tiempo y en la frecuencia	35
Ilustración 15: Respuesta a la salida del filtro utilizando la corriente de la onda viajera	38
Ilustración 16: Corriente de la onda viajera capturada tras una falta en la línea real	38
Ilustración 17: Variación del tiempo de llegada dependiendo del ajuste de la línea del flanco ascendente	39
Ilustración 18: Salida de la onda de corriente del filtro de paso bajo	40
Ilustración 19: Diagrama de bloques del método del diferenciador	41
Ilustración 20: Evolución de la onda de corriente	41
Ilustración 21: Estimación del tiempo de llegada	41
Ilustración 22: Estimación del tiempo de llegada basándose en la mejor parábola de ajuste	42
Ilustración 23: Causas de la determinación de errores diferentes en cada extremo debidas a la dispersión.	42
Ilustración 24: Esquema del método de doble extremo para la localización de la falta a través de los DFR	46
Ilustración 25: Aplicación de la transformada de Park en (a) máquinas eléctricas y (b) detección de transitorio	46
Ilustración 26: Detección del transitorio utilizando la transformada de Park para una falta bifásica a tierra	48
Ilustración 27: Detección del instante inicial del transitorio mediante el análisis por el coeficiente $cdiff^2$	52
Ilustración 28: Detección de transitorio en ambos extremos de una línea mediante el análisis $cdiff^2$	53
Ilustración 29: Falta en un punto m en un sistema de una línea	55
Ilustración 30: Circuito eléctrico correspondiente al sistema anterior	55
Ilustración 31: Cálculo del ángulo T	59
Ilustración 32: Circuito de redes de secuencia para una falta monofásica a tierra	60
Ilustración 33 Resultado del algoritmo de Takagi para faltas monofásicas a tierra con un 100% de carga en [18]:	63
Ilustración 34: Resultado del algoritmo Takagi para faltas monofásicas a tierra con un 50% de carga [18]	63
Ilustración 35: Diagrama del sistema a estudiar	69
Ilustración 36: Representación de la línea de parámetros distribuidos en ATPDraw	70
Ilustración 37: Disposición de las fases a lo largo de la línea	71
Ilustración 38: Representación de la transposición de fases en ATPDraw	71

<i>Ilustración 39: Representación de la fuente de tensión senoidal en ATPDraw</i>	71
<i>Ilustración 40: Representación del interruptor trifásico controlado por tiempo en ATPDraw</i>	72
<i>Ilustración 41: Representación del amperímetro en ATPDraw</i>	72
<i>Ilustración 42: Representación del voltímetro en ATPDraw</i>	72
<i>Ilustración 43: Representación de un cortocircuito monofásico a tierra en ATPDraw</i>	74
<i>Ilustración 44: Representación de la caja separadora en ATPDraw</i>	75
<i>Ilustración 45: Sistema de localización de falta mediante onda viajera basado en un extremo de línea</i> ..	76
<i>Ilustración 46: Sistema de localización de falta mediante onda viajera basado ambos extremos de línea</i>	77
<i>Ilustración 47: Sistema de localización de falta mediante el método tradicional</i>	78
<i>Ilustración 48: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo l</i>	81
<i>Ilustración 49: Coeficientes del cuarto nivel de detalle</i>	82
<i>Ilustración 50: Coeficientes de la corriente del extremo l</i>	83
<i>Ilustración 51: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo l</i>	83
<i>Ilustración 52: Coeficientes de la corriente del extremo r</i>	84
<i>Ilustración 53: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo r</i>	84
<i>Ilustración 54: Oscilograma de tensiones y corrientes</i>	85
<i>Ilustración 55: Calculadora de la impedancia de falta</i>	86
<i>Ilustración 56: Coeficientes de detalle de cuarto nivel de la corriente</i>	87
<i>Ilustración 57: Nivel 3 de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo l</i>	87
<i>Ilustración 58: Nivel 3 de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo r</i>	88
<i>Ilustración 59: Señales de tensiones y corrientes</i>	89
<i>Ilustración 60: Cálculo de la impedancia de falta</i>	90
<i>Ilustración 61: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente</i>	91
<i>Ilustración 62: Tercer nivel de los coeficientes de la corriente del extremo l</i>	91
<i>Ilustración 63: Tercer nivel de los coeficientes de la corriente del extremo r</i>	92
<i>Ilustración 64: Muestras de las tensiones y corrientes en el extremo l</i>	92
<i>Ilustración 65: Cálculo de impedancia de falta</i>	94
<i>Ilustración 66: Nivel 3 de los coeficientes de detalle del análisis wavelet</i>	94
<i>Ilustración 67: Coeficientes de detalle de tercer nivel para la corriente del extremo l</i>	95
<i>Ilustración 68: Coeficientes de detalle de tercer nivel para la corriente del extremo r</i>	95
<i>Ilustración 69: Cálculo de la impedancia de falta</i>	95
<i>Ilustración 70: Cuarto nivel del coeficiente de detalle para la corriente del extremo l</i>	96
<i>Ilustración 71: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo l</i>	97
<i>Ilustración 72: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo r</i>	97
<i>Ilustración 73: Cálculo de la impedancia de falta para el caso 5</i>	98
<i>Ilustración 74: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente</i>	99
<i>Ilustración 75: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente de l</i>	99
<i>Ilustración 76: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente de r</i>	100
<i>Ilustración 77: Cálculo de la impedancia de falta</i>	100
<i>Ilustración 78: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente de l</i>	101
<i>Ilustración 79: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo l</i>	102
<i>Ilustración 80: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo r</i>	102
<i>Ilustración 81: Cálculo de la impedancia de falta</i>	103
<i>Ilustración 82: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente de l</i>	104
<i>Ilustración 83: Coeficiente de detalle de la corriente del extremo l</i>	104
<i>Ilustración 84: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo r</i>	105
<i>Ilustración 85: Cálculo de la impedancia de falta</i>	105
<i>Ilustración 86: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo l</i>	106

<i>Ilustración 87: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo l</i>	107
<i>Ilustración 88: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo r</i>	107
<i>Ilustración 89: Cálculo de la impedancia de falta</i>	108
<i>Ilustración 90: Escala de tiempos atómicos</i>	116
<i>Ilustración 91: Distribución de tiempos basada en el protocolo IRIG-B</i>	116
<i>Ilustración 92: Distribución de tiempos basada en el protocolo IEEE 1588</i>	117
<i>Ilustración 93: Método de distribución de tiempos mediante antenas redundantes</i>	118
<i>Ilustración 94: Método de distribución de tiempos redundante a partir de relojes GPS</i>	119
<i>Ilustración 95: Método de distribución de tiempos a través de una subestación adyacente</i>	119
<i>Ilustración 96: Método de distribución de tiempos a través de un sistema multiplexor de división de tiempos</i>	120
<i>Ilustración 97: Torre de alta tensión de la línea a estudiar</i>	121
<i>Ilustración 98: Detalle de la distribución de los conductores en una fase</i>	122
<i>Ilustración 99: Sección del cable tipo CARDINAL</i>	123
<i>Ilustración 100: Sección de un cable tipo "OPGW 52F.O"</i>	123
<i>Ilustración 101: Pestaña de dimensionamiento de la línea en ATPDraw</i>	124

Índice de tablas

Tabla 1: Presupuesto del proyecto	17
Tabla 2: Impedancias de secuencia directa de la línea dependiendo del tipo de falta en la línea.	56
Tabla 3: Parámetros de la línea.....	73
Tabla 4: Parámetros de entrada del caso 1.....	81
Tabla 5: Resultados obtenidos del caso 1.....	86
Tabla 6: Parámetros de entrada del caso 2.....	86
Tabla 7: Resultados obtenidos del caso 2.....	89
Tabla 8: Parámetros iniciales del caso 1.....	89
Tabla 9: Resultados obtenidos del caso 3.....	93
Tabla 10: Características de la resistencia de falta	93
Tabla 11: Resultado obtenidos del caso 5	96
Tabla 12: Parámetros de la falta monofásica a tierra para el caso 5.....	96
Tabla 13: Resultado del caso 5	98
Tabla 14: Parámetros de la falta monofásica a tierra para el caso 6.....	99
Tabla 15: Resultados del caso 6.....	101
Tabla 16: Características de la falta para el caso 7	101
Tabla 17: Resultados del caso 7.....	104
Tabla 18: Características de la falta del caso 8	104
Tabla 19: Resultados del caso 8.....	106
Tabla 20: Características de la falta del caso 9	106
Tabla 21: Resultados del caso 9.....	109

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En la época actual la electricidad se ha convertido en un bien básico y las previsiones indican que en los próximos años la energía eléctrica seguirá siendo cada vez más importante. La creciente presencia de generación basada en electrónica de potencia, generación distribuida y el creciente mallado de la red de transporte lleva a que actualmente las empresas encargadas de gestionar los sistemas eléctricos se planteen la necesidad de reducir el tiempo de detección de las faltas que aparecen en las líneas, con el fin de mejorarla estabilidad del sistema. Además, también tienen la necesidad de realizar un rápido despeje de la misma, tiempo que actualmente viene determinado principalmente por los tiempos de extinción del arco en los interruptores, sin embargo, para lograr este objetivo, también es clave la rápida identificación y localización de la falta en la línea por parte de los sistemas de protección. La existencia de líneas largas redonda en la necesidad de usar sistemas de protección que permitan localizar el punto del defecto con gran precisión focalizando directamente todos los recursos, tanto técnicos como humanos, en la ubicación del problema y no desperdiciarlos revisando la totalidad de la línea o grandes secciones de la misma. De este modo se conseguirá disminuir los tiempos de restablecimiento del elemento defectuoso devolviendo al sistema eléctrico a la configuración previa a la aparición del defecto en el menor tiempo posible.

Los defectos en el sistema eléctrico pueden ocasionar interrupciones del servicio a los usuarios provocando pérdidas económicas en diferentes sectores. Por ejemplo, en el sector industrial debido a la parada de maquinaria en procesos de producción, mientras que en el sector público afecta al desarrollo normal de actividades como el transporte.

Un gran número de faltas se presentan en los sistemas eléctricos, afectando a consumidores y aumentando los costes de operación y mantenimiento para las empresas eléctricas. Por este motivo se están realizando estudios sobre nuevos métodos para que la localización de faltas sea más precisa y rápida, disminuyendo así el tiempo que se interrumpe el servicio. Uno de estos nuevos métodos es el de localización de falta por ondas viajeras, el cual se basa en los tiempos de llegada de las ondas de tensión y corriente que se producen en una falta.

Entre los aspectos más importantes de la calidad de suministro de energía eléctrica se encuentran la calidad de onda, la atención comercial y la continuidad del suministro eléctrico. La calidad de la forma de onda está referida a las perturbaciones de tensión (flicker, huecos de tensión, sobretensiones...) o frecuencia, mientras que la atención comercial se puede medir a partir del tiempo de espera de conexión, respuesta de reclamaciones, etc. La continuidad del suministro eléctrico se determina a partir del número y duración de las interrupciones producidas, tanto de forma individual como en el conjunto del sistema. Como se puede observar, la continuidad de suministro está estrechamente ligada con la localización de faltas,

ya que cuanto mayor sea el error en la estimación de la localización y más se tarde tanto en detectarla como en despejarla peor será la continuidad del suministro y por lo tanto existe peor calidad de la energía.

Si las empresas encargadas del sistema no cumplen con los requisitos mínimos de calidad deben de realizar las inversiones supervisadas por el organismo regulador para cumplir con los requisitos mínimos. Además, el no cumplimiento de los mínimos conlleva repercusiones sobre los ingresos que reciben dichas empresas.

1.2 Objetivo

El objetivo principal que aborda este proyecto es la investigación sobre la localización de faltas basándose en ondas viajeras.

Se propone el método de localización de faltas por ondas viajeras como un método novedoso que utiliza las ondas de tensión o corriente para determinar la localización de la falta y ofrecer una solución frente al problema de la poca precisión en la localización de los métodos tradicionales.

Para ello se realizará un análisis comparativo entre los métodos tradicionales y el método de las ondas viajeras, tanto a nivel teórico como a nivel práctico, mediante simulaciones en líneas de transporte.

Con este proyecto se quiere demostrar las ventajas del método de ondas viajeras en estimación de localización de falta y en tiempos de detección de la misma frente a otros métodos, teniendo una mayor precisión y un menor tiempo de detección.

1.3 Espacio socioeconómico

El sistema eléctrico actual se encuentra inmerso en un proceso de transformación desde un sistema basado en generación síncrona y consumidores que se pueden denominar pasivos hacia un sistema con gran penetración de energías renovables y en las que los consumidores cada vez más juegan un papel cada vez más relevante en el funcionamiento del sistema eléctrico a través de la generación distribuida, la demanda inteligente y el incremento de usuarios de vehículos eléctricos. Ligada a este nuevo escenario, aparece la electrónica de potencia, que proporciona a todos los agentes que participan en el sistema eléctrico nuevas herramientas para la gestión eficiente de sus recursos.

La electricidad a día de hoy, se ha convertido en un bien totalmente necesario para la sociedad en que vivimos, habiéndose hecho indispensable su empleo en nuestra actual forma de vida. Sin embargo, en una sociedad cada vez más electrificada, no requiere únicamente un suministro eléctrico, sino que, este debe garantizar unas condiciones óptimas de calidad en los puntos de demanda.

Los sistemas de protección de las actuales redes de transporte de energía eléctrica, se diseñaron con el objeto de proteger los elementos que componen un sistema tradicional, en el cual las fuentes de corriente de cortocircuito son principalmente máquinas síncronas. La protección de distancia, basada en la medida de la impedancia de secuencia directa hasta el punto de falta, es uno de los sistemas de protección más extendidos en las redes de transporte en alta tensión y en niveles inferiores hasta 66 kV. Sin embargo, su principio de medida se basa en las tensiones y corrientes medidas a través de transformadores de tensión y corriente, lo que lleva a una composición de errores de modo que, a la hora de localizar el punto de falta puede suponer la revisión de una gran distancia por los equipos de mantenimiento de líneas para localizar el posible defecto. Por otro lado, este principio de funcionamiento opera en torno a un ciclo, lo que unido a los tiempos de apertura del interruptor hace que los tiempos medios de despeje de faltas sean mayores de 40 ms habitualmente.

De lo anteriormente comentado se desprende que, la búsqueda de sistemas de protección capaces de garantizar un despeje de faltas más rápido y una mejor localización de las faltas, redundará en una disminución de los tiempos de indisponibilidad de los elementos que conforman la red de transporte y un alargamiento de la vida útil de los equipos que deberán soportar durante menos tiempo las corrientes de cortocircuito.

La protección de líneas mediante el empleo de ondas viajeras trata de contribuir a la reducción en los tiempos de detección de faltas (1.5-4ms) y de proporcionar una herramienta fiable para la localización del punto exacto de la falta. Este proyecto, tratará de analizar, como una primera aproximación, algunas de las ventajas que este principio ofrece frente a los algoritmos tradicionales de medida de la impedancia hasta el punto de falta.

1.4 Presupuesto del proyecto

CLIENTE:

Universidad Carlos III de Madrid

Dirección: Av. de la Univesidad,30
28911 Leganés

CONCEPTO:

Realización del proyecto: " Análisis comparativo del sistema de localización de faltas por onda viajera frente a los sistemas tradicionales."

Costes directos:

	Nº de unidades	Precio unitario	Precio
Horas de investigación y elaboración del proyecto incluyendo la Información teórica y las simulaciones para corroborar el correcto funcionamiento del sistema de protección durante cuatro meses.	320	21€/h	6720€
Horas de dirección y supervisión del trabajo realizado durante el periodo de 4 meses.	40	36€/h	1440€
Licencia del software ATP-EMTP para la simulación de transitorios.	1	Gratuita	0€
Licencia del software Matlab para el cálculo de la localización de falta.	1	Gratuita	0€
Licencia del software WAVEWIN para el análisis de cortocircuitos a través de sus oscilogramas.	1	Gratuita	0€

Total costes directos: 8160€

Costes indirectos:

	Nº de unidades	Precio unitario	Precio
Equipamiento y soporte del material Utilizado, suministro y consumibles	1	2040€	2040€

Total costes indirectos:
2040€

Total costes: 10200€

<u>IMPORTE:</u>	
	Total
Base imponible	10200€
IVA (21%):	2142€
TOTAL:	12342€
<i>Realización del trabajo entre los meses de febrero y mayo</i> <i>Investigación realizada por Daniel Fernández González: Ingeniero Junior</i> <i>Supervisión realizada por David López Cortón: Ingeniero Senior</i>	

Tabla 1: Presupuesto del proyecto

1.5 Marco regulador

Los requerimientos de la protección de distancia se rigen por las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) o por su equivalente de norma española (UNE) en este proyecto se va a cumplir todo lo establecido en la norma IEC 60255 /UNE-EN60255 " Relés de medida y equipos de protección ", en la cual están reflejados los requisitos generales para los relés y el equipo de protección, para nuestro caso en particular vamos a utilizar una parte de esta norma, la IEC 60255-121 /UNE-EN60255-121 " Requisitos funcionales para la protección de distancia" donde se encuentra reflejado los requisitos mínimos para la protección de distancia.

En esta norma se tratan las especificaciones mínimas requeridas para la evaluación y actuación de la protección de distancia. Esta norma no está limitada a los sistemas de protección de distancia trifásicos conectados a tierra, sino que también define como documentar y publicar pruebas de rendimiento. Cubre la función de protección de distancia cuya característica de funcionamiento puede ser definida en un plano de impedancia. Incluye especificaciones de la función de distancia, características de medición, selección de fase, direccionalidad, características de inicio y tiempo de retardo.

En esta norma están incluidas las metodologías de las pruebas para verificar la correcta actuación y precisión. La norma define los factores de influencia que afectan a la precisión en condiciones de estado estacionario y las características de rendimiento en condiciones de estado dinámico. También incluye los requisitos generales que deben cumplir los transformadores de medida para la función de protección por distancia.

Además, este proyecto va a cumplir la normativa sobre las medidas de sincrofasores expuestas en la normativa internacional IEEE C37.118.1-2011 y IEEE C37.118.2-2011. Con respecto a los protocolos de sincronización del tiempo explicados en el anexo II, el trabajo de fin de grado estará dentro del marco regulatorio compuesto por el IRIG STANDARD 200-04, donde se realiza una descripción general y detallada de los códigos de tiempo incluidos en el protocolo IRIG.

1.6 Estructura del documento

El presente trabajo de fin de grado se compone de 8 capítulos, bibliografía y tres anexos. A continuación se detalla el contenido de cada capítulo:

- Capítulo 1: se realiza una presentación de la situación actual sobre la localización y detección de falta, analizando los problemas asociados a una detección tardía y una localización con poca precisión. Después se analizan los objetivos del presente trabajo de fin de grado. Seguidamente se realiza un presupuesto detallado del coste de la realización de este proyecto. Más tarde se presentan la normativa internacional que tiene que cumplirse en el ámbito de las protecciones de distancia en alta tensión. Por último, se realiza un análisis del impacto social que tiene este proyecto.

- Capítulo 2: se presenta el fenómeno de onda viajera, comenzando con una descripción y su correspondiente modelo matemático. Igualmente se analizan los fenómenos asociados a la onda viajera, como la reflexión y la refracción a lo largo de una línea. También se presentan las principales causas de las faltas y la variación de la forma de onda durante el transitorio dependiendo de la naturaleza de la falta.

- Capítulo 3: se presenta la aplicación de ondas viajeras en un relé y los diferentes métodos que existen con sus correspondientes singularidades. Se analizan las distintas transformadas utilizadas para la detección de la onda viajera. Por último, se estudia la forma en la que el relé determina el tiempo de llegada de la onda viajera y la compensación que realiza para los posibles errores para dar como resultado una estimación de la localización de la falta.

- Capítulo 4: se presenta una variante más simple del método expuesto en el capítulo 3, la localización de falta basadas en registradores de eventos. Se analiza la transformada que utiliza para la detección del transitorio, así como el proceso que se realiza, desde la adquisición de datos hasta la estimación de la localización de la falta.

- Capítulo 5: se presentan los métodos tradicionales para la localización de falta, analizando y formulando los algoritmos más importantes que se han utilizado y se utilizan para ello. Por último, basándose en estudios realizados se analiza la precisión de estos métodos.

- Capítulo 6: se presenta un análisis comparativo, ofreciendo las ventajas y desventajas de los métodos tratados en los capítulos anteriores.

- Capítulo 7: se presenta el caso que va a ser simulado, una línea de alta tensión, así como los programas que van a ser utilizados para la realización de la simulación. Se explican los motivos de la elección de esta línea. Se analizan dos bloques diferentes, el comportamiento del relé respecto a variaciones en la impedancia de falta, y el comportamiento respecto a la variación de la localización del punto en el que se produce la falta.

- Capítulo 8: se presentan las conclusiones extraídas tanto de las simulaciones como de la parte teórica. Se exponen trabajos futuros sobre los que se puede investigar relacionados con la protección de distancia por onda viajera.

- Anexo I: se presenta el método por el cual el relé es capaz de sincronizar el tiempo, introduciendo la tecnología utilizada actualmente. Se explican las ventajas y desventajas de los diferentes métodos existentes. Por último, se plantea métodos para evitar que el relé reciba un tiempo erróneo.

- Anexo II: Se presenta la disposición geométrica de los conductores en la línea mediante el dimensionado de una de las torres. Se realiza la explicación de cómo introducir esos parámetros en el programa de cálculo.

-Anexo III: Se presenta el código utilizado en Matlab para la estimación del tiempo de llegada de la onda viajera, a través de la transformada discreta de wavelet.

CAPÍTULO 2

ONDAS VIAJERAS

2.1 Descripción y ecuaciones

Cuando en una línea de transmisión, con parámetros distribuidos, se produce una perturbación, como una falta o una descarga atmosférica surgen ondas de tensión y corriente que viajan a través de la línea con una velocidad muy cercana a la velocidad de la luz, estas ondas sufren refracciones y reflexiones hasta desaparecer una vez realizadas algunas refracciones.

La ecuación de onda es una importante ecuación diferencial, en derivadas parciales, lineal de segundo orden que describe la propagación de las ondas. Estas ecuaciones relacionan la tensión y la corriente de la línea larga en función del tiempo y del espacio.

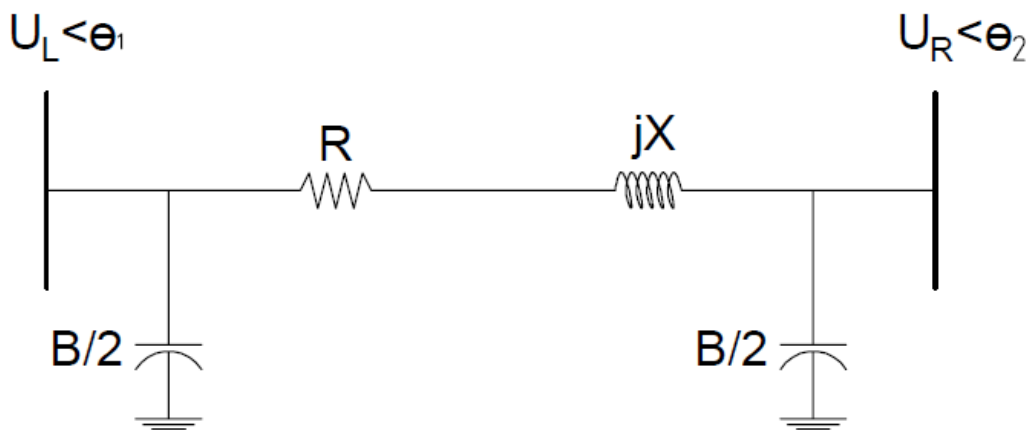


Ilustración 1. Modelo Π de una línea de transmisión

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L'C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L'C \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2)$$

La solución de D'Alembert de las ecuaciones diferenciales anteriores, tiene como resultado las siguientes ecuaciones de onda de tensión y corriente, para una línea de transmisión monofásica con parámetros distribuidos y sin pérdidas:

$$u(x, t) = F_1(x - vt) + F_2(x + vt) \quad (3)$$

$$i(x, t) = [F_1(x - vt) + F_2(x + vt)]/Z_o \quad (4)$$

Donde x es la posición a lo largo de la línea, t es el tiempo, v es la velocidad de propagación y Z_o es la impedancia característica de la línea. F_1 y F_2 son funciones que dependen de las condiciones de frontera del caso que se esté analizando, F_1 representa una onda que se desplaza en la dirección positiva de x a una velocidad c (onda directa), mientras que F_2 también es una onda pero se desplaza en la dirección negativa de x (onda inversa).

La ecuación que describe la velocidad de propagación es:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (5)$$

Mientras que la ecuación que describe la impedancia característica de la línea es:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (6)$$

Para ambas L' es la inductancia por metro de línea y C' es la capacidad por metro de línea. La función F_1 representa una onda directa, la cual se desplaza en la dirección positiva de x a una velocidad c . La función F_2 es la onda inversa y se desplaza en la dirección negativa de x a la misma velocidad. Ambas funciones dependen de las condiciones de frontera del caso que se esté analizando. Si se realiza la medición de la tensión y la corriente en una localización concreta, x , es posible identificar F_1 y F_2 formando las señales denominadas S_1 y S_2 .

$$S_1 = 2F_1(x - ut) = v(x, t) + Z_o i(x, t) \quad (7)$$

$$S_2 = 2F_2(x + ut) = v(x, t) - Z_o i(x, t) \quad (8)$$

Realizando la medición en $x = 0$, S_1 representa el cambio de señal en la ubicación del relé, debido a la onda directa, mientras que S_2 lo hace debido a la onda inversa. De este modo se muestra la diferencia entre las ondas viajeras directas y las inversas. Esto está reflejado en las ecuaciones (9) y (10):

$$S_1 = 2F_1(-ut) = v(0, t) + Z_o i(0, t) \quad (9)$$

$$S_2 = 2F_2(ut) = v(0, t) - Z_o i(0, t) \quad (10)$$

El análisis anterior únicamente es válido para un sistema monofásico. En los sistemas trifásicos existe mayor dificultad para analizar las ondas viajeras debido a los acoplamientos entre los conductores. El método que se aplica a los sistemas trifásicos se basa en descomponer las señales de fase en sus correspondientes modos de propagación, cada modo tiene su propia atenuación y velocidad de propagación. La transformación modal se realiza con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta v_m(t) = \frac{1}{S} \Delta V_f(t) \quad (11)$$

$$\Delta i_m(t) = \frac{1}{Q} \Delta i_f(t) \quad (12)$$

Donde Δv_f y Δi_f son las tensiones y las corrientes incrementales de fases y Δv_m y Δi_m son sus correspondientes tensiones y corrientes modales. Estas señales se obtienen mediante la utilización de un filtro en las señales de tensión y corriente para eliminar las condiciones de pre-falta. Tanto S como Q son las matrices de transformación, siendo las más comunes las de componentes simétricas. La descomposición modal permite analizar un sistema trifásico, en función de tres modos de propagación, tratándolos como tres sistemas monofásicos.

2.2 Reflexión y refracción

A continuación vamos a explicar los fenómenos que sufren estas ondas.

Estas ondas se van propagando por la línea hasta que se encuentran con una discontinuidad, estas discontinuidades pueden ser subestaciones o uniones con otras líneas. En esa discontinuidad la onda se dividirá en dos: una onda reflejada y otra onda transmitida.

Cuando la onda electromagnética asociada a la energización de la línea llega a un punto de discontinuidad, parte de la onda prosigue su camino y parte de la onda regresa por donde vino.

Supongamos una onda viajera de tensión que se propaga por una línea L1 y llega a un punto de unión de esa línea con otra línea L2 de distinta impedancia de onda. Al llegar la tensión a la discontinuidad, la tensión en el punto de unión toma un cierto valor. Esa tensión se propaga a la línea L2, pues esa línea está conectada a ese punto. La propagación de esa onda de tensión por la línea L2 requiere de la circulación de una intensidad por la línea L2. Pero como la impedancia de onda en la línea L2 es diferente que la de la línea L1, la intensidad i_{1i} no puede ser igual que la intensidad i_{2i} . Sin embargo, en todo punto del espacio se ha de cumplir la primera ley de Kirchhoff. Por tanto, la intensidad restante debe retornar a la fuente por la misma línea que llegó.

La primera Ley de Kirchhoff enuncia: “La corriente que circula por la línea 1 debe ser igual a la que prosigue por la línea 2”, y como en la línea 1 hay dos ondas de corriente (la incidente y la reflejada) la corriente en la línea 1 será $i = i_{1i} + i_{1r}$, mientras que la corriente en la línea 2 es $i_2 = i_{2i}$.

Aplicando la primera ley de Kirchhoff al punto de discontinuidad se obtiene:

$$i_{1i} + i_{1r} = i_{2i} \quad (13)$$

En el punto de discontinuidad la tensión debe ser la misma, independientemente de que me acerque a ese punto por la izquierda o por la derecha. Por tanto, la calcularemos en un punto infinitamente próximo por su derecha y por su izquierda.

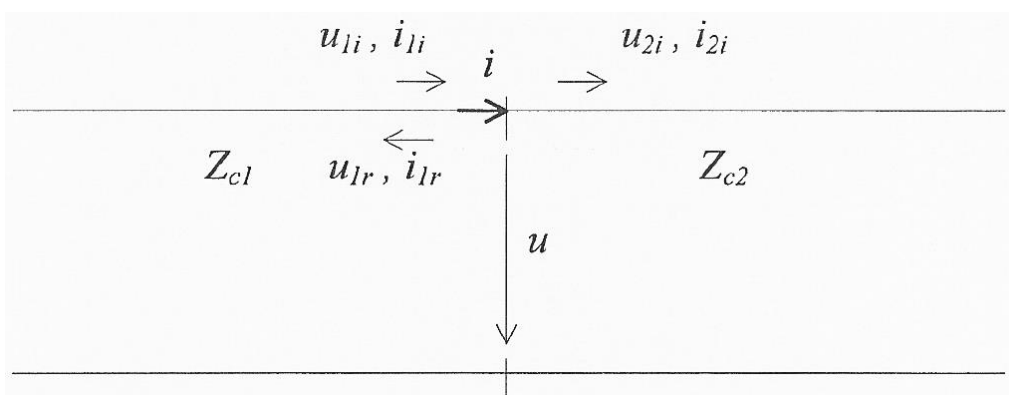


Ilustración 2: Tensiones y corrientes de la onda al atravesar un punto de discontinuidad

Como se puede ver en la imagen la notación con la que se va a trabajar a partir de ahora es la siguiente: las tensiones son representadas con la letra u mientras que las corrientes lo son con la letra i , el subíndice para ondas reflejadas es r mientras que para ondas incidentes lo es i . Las impedancias de las líneas son representadas con Z_{c1} para la impedancia característica de la línea 1 y con Z_{c2} para la impedancia característica de la línea 2.

De este modo se puede calcular tanto las tensiones como las corrientes.

$$u = u_{1i} + u_{1r} \quad (14)$$

$$u = u_{2i} \quad (15)$$

$$i_{1i} = \frac{u_{1i}}{Z_{c1}} \quad (16)$$

$$i_{1r} = -\frac{u_{1r}}{Z_{c1}} \quad (17)$$

$$i_{2i} = \frac{u_{2i}}{Z_{c2}} \quad (18)$$

Operando para las ondas reflejadas se llega a:

$$u_{1r} = p_1 u_{1i} \quad (19)$$

Mientras que para las ondas transmitidas se llega a:

$$u_{2i} = \tau_1 u_{1i} \quad (20)$$

Donde p_1 es el coeficiente de reflexión y τ_1 el coeficiente de refracción y se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$p_1 = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \quad (21)$$

$$\tau_1 = \frac{2Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \quad (22)$$

Los frentes de ondas viajeras que se propagan por una línea sufren una modificación en su contorno al atravesar una discontinuidad. Como se puede observar en la siguiente figura:

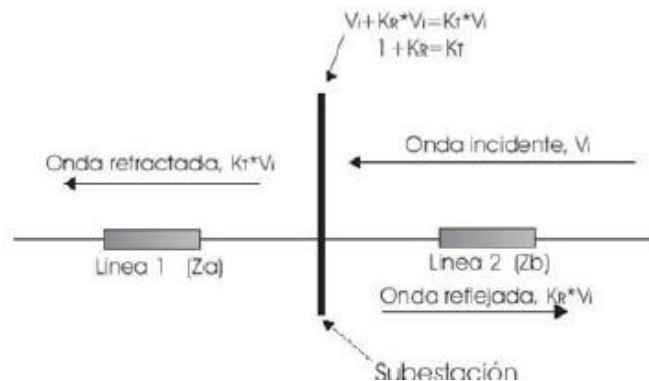


Ilustración 3: Propagación de una onda viajera en una discontinuidad

La onda incidente V_i , se propaga por la línea 2, la cual tiene una impedancia característica Z_b , alcanza la discontinuidad y continua a través de la línea 1, con una impedancia Z_a , como una onda refractada, cambio su contorno a $\tau_1 V_i$. Del mismo modo se puede observar como parte de la onda incidente, regresa por la línea 2 en forma de onda reflejada y su contorno valdrá $p_1 V_i$.

Cabe destacar el caso en el que las impedancias características de ambas líneas sean iguales. En este concreto caso, el contorno de la onda viajera no se ve modificado y no existe onda reflejada, solo existiría onda refractada. En los sistemas eléctricos reales es muy difícil que se de esta situación. Una de las cualidades por las que se pueden utilizar las ondas viajeras para detectar faltas es porque las ondas viajeras que se propagan a través de una línea homogénea se ven afectadas mínimamente en su contorno aunque se consideren las pérdidas por atenuación.

2.3 Naturaleza de las faltas

La forma de las ondas viajeras está afectada por fenómenos como la dispersión o la atenuación, pero también depende de la naturaleza de la falta.

En las líneas de transmisión de muy alta tensión, 220 kV o 400 kV, se utilizan conductores desnudos suspendidos entre apoyos, los cuales tienen frecuentemente uno o más cables de guarda sobre ellos. Estos cables de guarda actúan como jaula de Faraday para evitar interferencias tanto entre el cable y el exterior como del exterior y el cable. Las líneas de transmisión están expuestas a impactos de rayos, a penetración de la vegetación, incendios forestales, fallos de aislamiento, vandalismo y desastres naturales. Aunque el impacto de rayos en ellas es la causa que se responsabiliza del mayor número de faltas.

Las faltas que se producen por fallos en el aislamiento evolucionan muy rápido, creando un transitorio de onda viajera limpio, como se puede ver en la ilustración 4. Si existen objetos cercanos a la falta, como torres de líneas adyacentes o instrumentos de transformación, pueden producir múltiples reflexiones. Las cuales podrían generar ondulaciones en el flanco descendente del transitorio aunque el flanco de subida no se vería afectado. Esto se puede observar en ilustración 4.

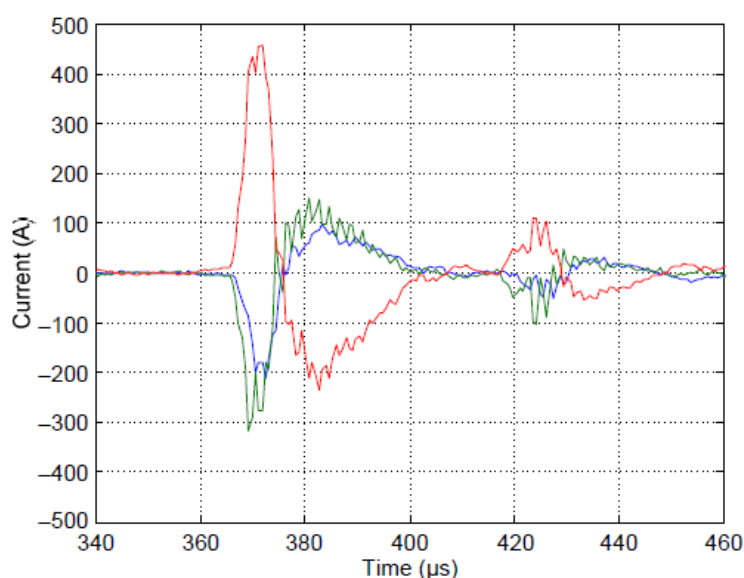


Ilustración 4: Evolución de la corriente de la onda viajera producida por una falta debido a un fallo en el aislamiento

La situación es más compleja cuando se produce por el impacto de los rayos. Una posibilidad es que los rayos no lleguen a impactar en ningún conductor, sino que impacten cerca de la línea. Esto es un problema debido a que causa transitorios de onda viajera, pero estos transitorios no son originados por faltas en el sistema de potencia, por lo que puede inducir errores.

Otra posibilidad es que el rayo impacte en un cable de guarda, provocando que la corriente del rayo fluya a tierra a través de las torres más próximas. El potencial del cable de guarda y de la

estructura de la torre será elevado y en algunos casos puede exceder el nivel de aislamiento de la línea, provocando la aparición de arcos que se ceban a través de los aisladores.

Para complicar todavía más la forma de la señal de onda viajera, el fenómeno de la aparición del arco puede ocurrir casi simultáneamente en más de un lugar, como diferentes torres o fases. La probabilidad de que suceda es menor en líneas con voltajes más elevados. En la ilustración 5 se muestra un arco con una onda viajera precursora que llega alrededor de 8 μs antes que la onda producida por el arco principal. Las corrientes precursoras son el resultado del acoplamiento entre los conductores de la línea y el conductor a tierra que transporta la corriente del rayo.

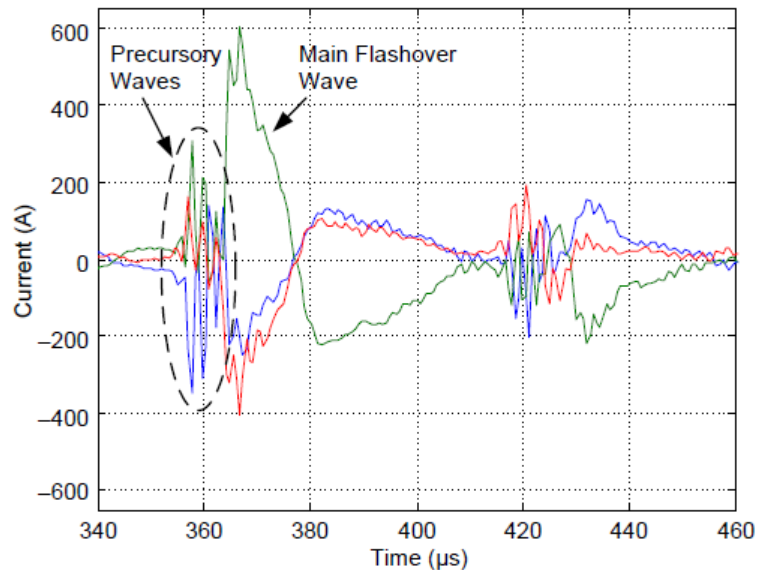


Ilustración 5: Evolución de las corrientes de fase para una falta monofásica a tierra debido al impacto de un rayo en el hilo de guarda

La última posibilidad que puede ocurrir es que el rayo impacte directamente en una de las fases del conductor. Este tipo de impactos es poco habitual en líneas que contengan cables de guarda, como las líneas de alta tensión, y se clasifica como un fallo en el blindaje.

Los localizadores de faltas basados en ondas viajeras necesitan ser capaces de operar en numerosos eventos en los cuales puede haber múltiples casuísticas.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALTA BASADOS EN ONDAS VIAJERAS

3.1 Introducción y aspectos generales

Las ondas viajeras son señales de alta frecuencia. Los valores de su frecuencia fundamental están dentro del rango que abarca desde los 20 kHz hasta los 2 MHz. Por lo que los relés que utilizan las ondas viajeras tienen una frecuencia de muestreo muy próxima a ese intervalo.

Los métodos basados en ondas viajeras utilizan el origen natural de las sobretensiones y las ondas que se generan por el cortocircuito. Estos métodos pueden presentar un error de unos 300 metros lo que supone conocer entre qué dos torres de alta tensión se ha producido la falta, ya que la distancia media entre los vanos en torres de alta tensión es de 500 metros aproximadamente.

Una falta en una línea de transmisión produce ondas viajeras tanto de tensión como de corriente, cualquiera de las dos puede ser utilizada para una precisa localización de la falta. Al ser ambas validas, se utilizará la señal que presente menos problemas para su análisis en el relé. Debido a que la respuesta en frecuencia de los transformadores de corriente (transformadores de tipo inductivo) es mejor que la de los transformadores de tensión de capacitivos (comúnmente empleados en redes de muy alta tensión), es más adecuado el empleo de corrientes para la localización de falta por onda viajera ya que garantizarán una mayor precisión.

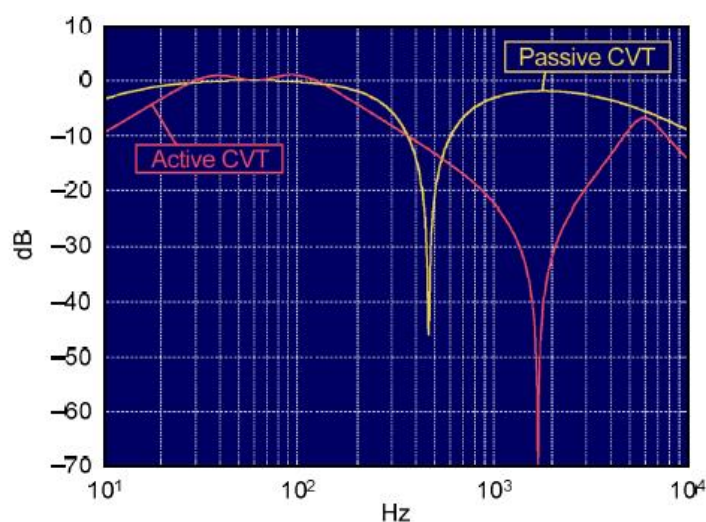


Ilustración 6: Respuesta de un transformador de tensión capacitivo

En la ilustración 6 se puede observar la respuesta de un transformador de tensión capacitivo basándose en la frecuencia de entrada. Se puede observar caídas bruscas en el rango de los kHz y una respuesta de desvanecimiento en el rango de 10 kHz. Esto provoca la necesidad de que la

onda viajera sea mucho más larga, para poder ser detectada de manera fiable. A continuación se va a comparar con la respuesta de un transformador de corriente, en la ilustración 7:

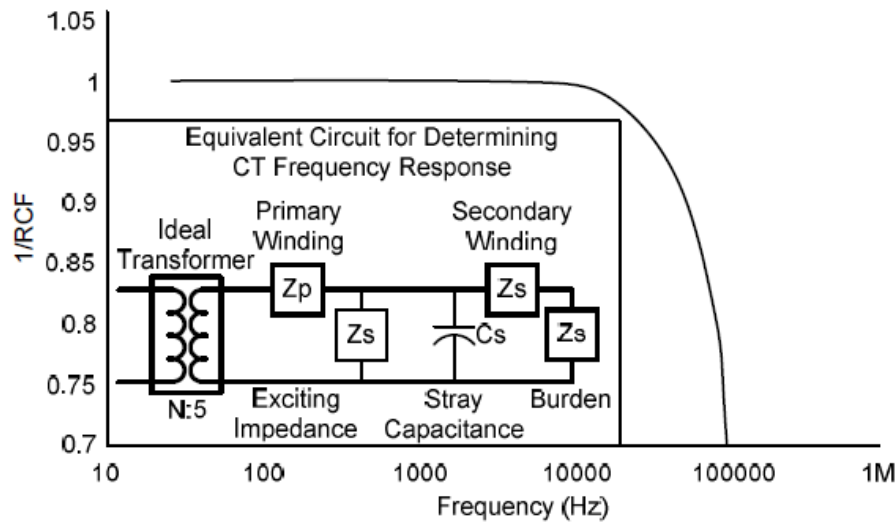


Ilustración 7: Respuesta de un transformador de corriente

La respuesta del transformador de corriente es más plana y ancha, haciendo que sea más adecuada para detectar ondas viajeras de manera más fiable y consistente. Se puede observar que a 100 kHz la respuesta del transformador solo baja hasta un 70%.

Hoy en día podemos diferenciar dos grandes grupos de métodos de actuación: uno que necesita las señales de las ondas viajeras a ambos extremos de la línea y otro, que utiliza un único extremo de la línea sumado a la información proveniente de las reflexiones y refracciones de ondas. A continuación, vamos a describir cómo operan cada uno de ellos.

3.2 Análisis del método basado en los dos extremos de la línea

Los localizadores modernos de falta basados en ondas viajeras utilizan una referencia de tiempo común (GPS, relojes atómicos...) para los dispositivos de ondas viajeras en los terminales de línea y para las comunicaciones encargadas de intercambiar los tiempos de llegada de las ondas de corriente ó tensión tras la aparición de un cortocircuito, para calcular la distancia al fallo m , de la siguiente manera:

$$m = \frac{1}{2} [l + (t_L - t_R)v] \quad (23)$$

Donde l es la longitud de línea, t_L es el tiempo de llegada de la onda al extremo L , t_R es el tiempo de llegada de la onda al extremo contrario, R , y v es la velocidad de propagación de la onda.

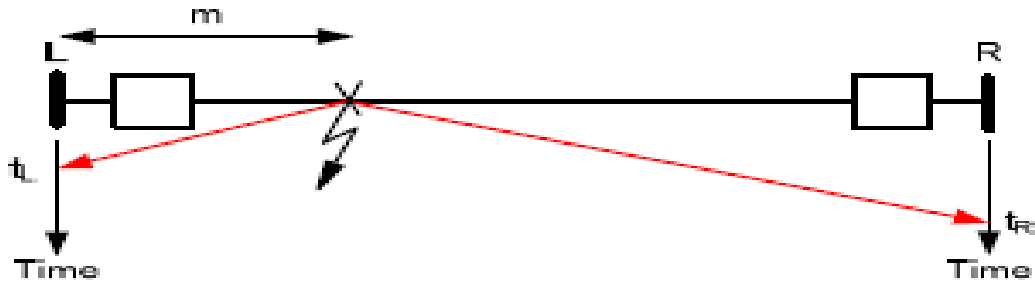


Ilustración 8: Principio de operación para detección de falta utilizando un tiempo común de referencia

Este método aprovecha el gran desarrollo de las tecnologías de comunicación digitales, utilizando un canal de comunicaciones de 64 kbps para intercambiar los datos de las corrientes. Los relés utilizan las ventajas de este ancho de banda e intercambian información de ondas viajeras sin afectar a la actuación de los elementos direccionales. Los relés intercambian el tiempo de llegada de las ondas viajeras y utilizan esta información para estimar la localización de la falta. Estos resultados se envían al centro de control, una vez pasados un par de segundos desde la ocurrencia de la falta. En la ilustración 9 se puede observar un esquema del intercambio de tiempos entre los relés.

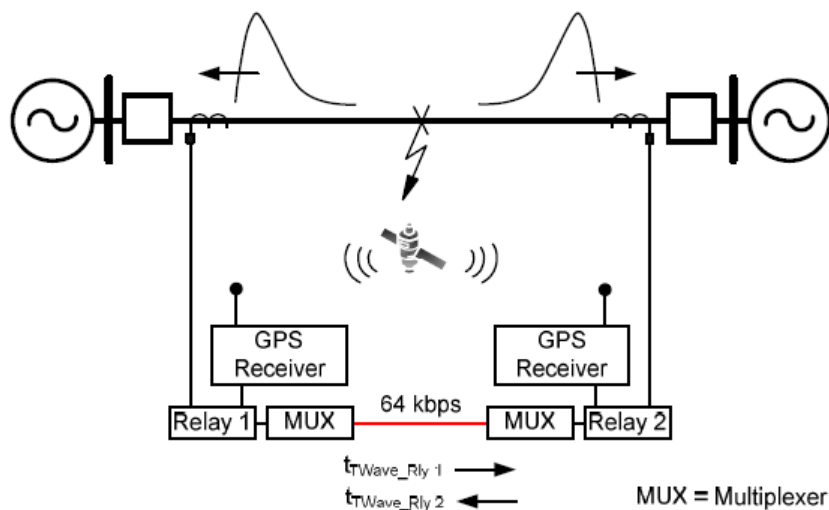


Ilustración 9: Esquema de comunicación entre relés

El enfoque del relé para este método es el siguiente:

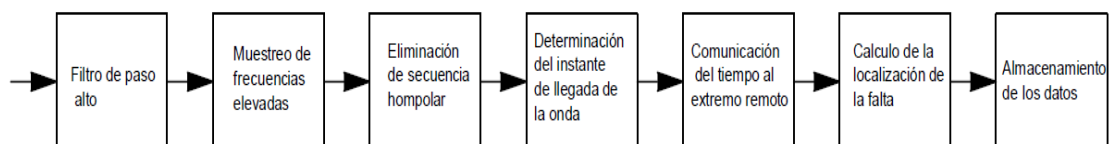


Ilustración 10: Diagrama de bloques del relé

- Filtra, mediante un filtro de paso alto, la corriente para eliminar la frecuencia del sistema.

- Realiza un muestreo a frecuencias elevadas.
- Elimina la secuencia cero para reducir los efectos de la dispersión o la distorsión.
- Determina el instante de llegada de la onda viajera de manera consistente y precisa a pesar de los efectos del ancho de banda, la dispersión y otros factores.
- Comunica al extremo remoto el tiempo de llegada de la onda viajera al extremo local.
- Calcula la locación de la falta.
- Guarda suficiente información de todos los eventos para analizar los resultados.

El fabricante de protecciones Schweitzer ha desarrollado un relé que es capaz de determinar la localización de las faltas basándose en las ondas viajeras utilizando el método descrito, para líneas de corriente alterna de alta tensión, el SEL-411L. Este relé utiliza un convertidor analógico-digital para medir las corrientes con una frecuencia de muestreo de 1.5625 MHz, extrayendo las señales de alta frecuencia para estimar la localización de la falta.

3.3 Análisis del método basado en un único extremo de la línea

El método de localización de faltas por onda viajera basado en un único extremo, utiliza la información de llegada de la onda viajera al extremo, también utiliza la información de la onda viajera reflejada. Esta onda reflejada se produce al llegar la onda viajera inicial a una discontinuidad, parte de ella continúa y otra parte de ella es reflejada hacia el mismo extremo.

En la siguiente figura se puede observar cómo es la evolución de una onda viajera en una línea cuando en esta se produce una falta.

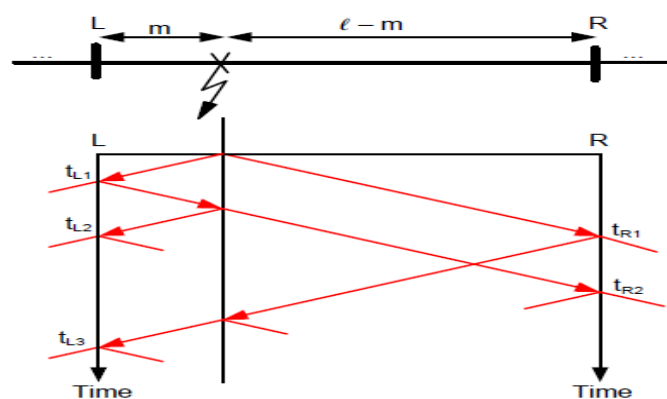


Ilustración 11: Diagrama de Lattice para una falta en un punto m

En el tiempo t_{L1} , se transmiten ambas ondas, tanto la transmitida como la reflejada. La onda reflejada continúa su camino por la línea hasta que vuelve al punto de la falta, en este momento esa onda reflejada se divide en dos: una transmitida, que sigue su camino hacia el extremo R y otra reflejada que vuelve hacia el extremo L, el tiempo en el cual esta segunda onda reflejada

llega al extremo L es t_{L2} . También se puede observar que la onda que se refleja en el extremo contrario en t_{R1} y vuelve por la línea hacia su camino, se transforma en una onda transmitida en el lugar de la falta y llega al extremo L en un tiempo t_{L3} .

La diferencia de tiempos entre t_{L2} y t_{L1} es el tiempo que tarda la onda en viajar desde el extremo L hasta que vuelve a llegar al mismo extremo, sucediendo en el punto m el fenómeno de la refracción. Para estimar la localización de una falta utilizando este método se necesita esta diferencia de tiempos, entre la primera onda que llega al extremo L y la siguiente onda reflejada.

$$m = \left(\frac{t_{L2} - t_{L1}}{2} \right) v \quad (24)$$

Donde t_{L1} y t_{L2} son los tiempos de llegada del frente de onda inicial y de la onda reflejada en el extremo de la línea L y v es la velocidad de propagación de la onda viajera.

El algoritmo debe ser capaz de descartar otras ondas reflejadas que puedan aparecer, ya que el extremo de la línea L está conectado con otra línea, de la que también pueden llegar reflexiones y refracciones de otras ondas.

Para aclararlo vamos a suponer que esta línea está conectada con otra línea corta, por el extremo L . De tal manera, que, al ser una línea corta, el otro extremo de esta está más cerca de L que el lugar donde se produce la falta. En la siguiente figura podemos ver cómo quedaría:

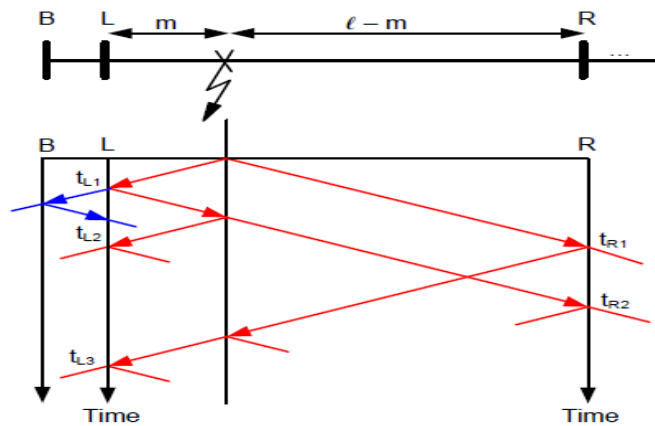


Ilustración 12: Diagrama de Lattice para una línea unida por uno de sus extremos a una línea corta

En este ejemplo vemos en color azul las ondas que están fuera de la línea que estamos estudiando, pero al ser la otra línea una línea corta podría darse el caso de que la onda reflejada en el extremo de la línea corta, B , alcance el relé antes del tiempo t_{L2} , pudiendo esto crear errores a la hora de calcular el lugar de la falta. Para que no ocurra este tipo de errores los relés de protección basados en ondas viajeras tienen en cuenta también la dirección y el sentido de las ondas, es decir, cuentan con una supervisión direccional.

Además de dar la información del lugar donde se produce la falta, la información que se extrae de las ondas viajeras puede proporcionar otros datos de interés. El método de localización de faltas mediante extremo único incluye información para estimar la longitud total de la línea. Esta longitud estimada es útil para verificar que es igual que la longitud de la línea real, de tal manera que también se verifica si el lugar en el que se ha calculado la falta es correcto o no. Si volvemos a la figura 4, podemos observar que el tiempo t_{L3} , tiempo de llegada de la onda viajera al extremo opuesto, menos el tiempo t_{L1} , tiempo en el que llega la primera onda viajera al extremo, es dos veces el tiempo de recorrido a lo largo de la línea menos dos veces el tiempo desde el fallo hasta el extremo L . El tiempo $t_{L3} - t_{L1}$ corresponde a la distancia $2l - 2m$. Con este tiempo de llegada de las ondas viajeras, podemos estimar la longitud de la línea de la siguiente manera:

$$l = \frac{v}{2} [(t_{L2} - t_{L1}) + (t_{L3} - t_{L1})] \quad (25)$$

Si dividimos la ecuación (24) entre la ecuación (25), podemos expresar el lugar de la falta por unidad de longitud en términos del tiempo:

$$\frac{m}{l} = \frac{(t_{L2} - t_{L1})}{(t_{L2} - t_{L1}) + (t_{L3} - t_{L1})} \quad (26)$$

El importante fabricante de protecciones Schweitzer ha desarrollado un relé que es capaz de detectar faltas basándose en las ondas viajeras utilizando el método descrito, para líneas de corriente alterna de alta tensión, el SEL T400L. Este, puede utilizar tanto el método de localización basado en los dos extremos como el método de un único extremo, el cual no requiere comunicación. Presenta una frecuencia de muestreo de 1 MHz.

3.4 Transformada wavelet

Esta transformada es un método matemático efectivo para las ondas viajeras transitorias. Ha sido utilizada en muchas ocasiones para la identificación de la fase afectada por la falta, la localización de falta de onda viajera y la protección de transformador. El termino wavelet significa “onda pequeña”, con esto se quiere referir a su carácter oscilatorio y a que su longitud es finita.

Mediante el uso de la transformada de Fourier, una onda sinusoidal se descompone en ondas sinusoidales de varias frecuencias. Análogamente la transformada wavelet puede descomponer

una señal en una versión desplazada y escalada de la original. Sin embargo, la diferencia con la transformada de Fourier es que la transformada de Wavelet permite la localización en el tiempo de diferentes componentes de frecuencia de la señal, es decir puede ajustar su ancho de pulso para su frecuencia. La transformada de Wavelet es utilizada como una herramienta matemática para analizar la onda viajera transitoria de tensión y de corriente.

El cálculo de los coeficientes de Wavelet conlleva un gran esfuerzo computacional. Por esto se elige la transformada discreta wavelet, de manera que el análisis será mucho más eficiente sin perder precisión.

La transformada discreta wavelet realiza un filtrado de una señal, en nuestro caso la de corriente del transitorio, en el dominio del tiempo mediante filtros de baso bajo y filtros de paso alto, eliminando así ciertas componentes de alta o baja frecuencia. Este procedimiento es repetitivo es decir se vuelven a filtrar las señales obtenidas a la salida de ambos filtros. Esta operación se denomina descomposición. De este modo, la señal se ha descompuesto en un cierto número de niveles definidos. Finalmente se obtiene un grupo de señales correspondientes a diferentes bandas de frecuencia pero que representan una única señal.

A la salida del filtro de paso alto se obtendrán los coeficientes de detalle (D), mientras que a la salida del filtro de paso bajo se obtendrán los coeficientes de aproximación (A). En la siguiente ilustración se puede observar un diagrama de bloques de la transformada, donde $\downarrow 2$ significa que el muestreo está reducido a la mitad, ya que en algunas ocasiones se requiere disminuir la cantidad de datos para el manejo de la señal:

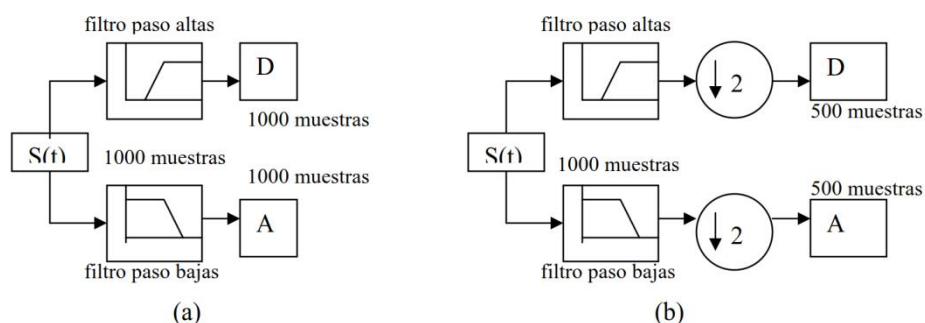


Ilustración 13: Separación de componentes de alta y baja frecuencia, (a) muestreo completo y (b) muestreo reducido

Con la transformada de Wavelet las frecuencias elevadas tienen mejor resolución en el tiempo, de manera que una determinada componente de alta frecuencia puede localizarse con menor error relativo que una componente de baja frecuencia. Por el contrario, las bajas frecuencias tienen mejor resolución en el dominio de la frecuencia, pudiéndose localizar mejor en frecuencia que una componente de alta frecuencia.

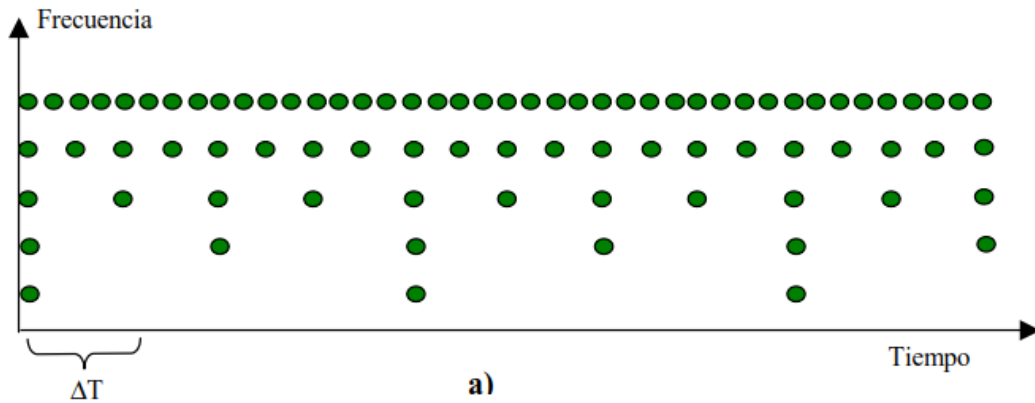


Ilustración 14: Gráfica de la resolución en el tiempo y en la frecuencia

En la ilustración 14 se puede observar que para frecuencias elevadas, la cantidad de puntos es mayor, para un mismo intervalo de tiempo. Mientras que en bajas frecuencias existen menos puntos de muestreo de la señal. Se puede afirmar que, las bajas frecuencias no tienen buena resolución en el tiempo, mientras que las altas frecuencias sí. Como las ondas viajeras tienen una frecuencia elevada, este método es perfecto para la estimación del tiempo de llegada del transitorio.

A continuación, se va a formular matemáticamente la transformada Wavelet discreta (DWT):

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] * g \left[\frac{k - na_0^m}{a_0^m} \right] \quad (27)$$

Donde: g es la wavelet madre, $x[n]$ donde se muestran los valores de la función de tiempo, a_0^m representa los factores de escala y na_0^m representa los factores de la translación.

El termino madre se refiere a una función principal, es decir la wavelet madre es un prototipo para generar las otras funciones. Existen muchos tipos de wavelet madres, como: Harr, Daubichies (db4), Coifelt y Symmlet (sym). Elegir el tipo de transformada madre es un paso clave para detectar y localizar los diferentes tipos de transitorio. La elección depende de la aplicación particular para la que se quiera utilizar, en nuestro caso, debido a que las ondas viajeras son transitorios rápidos y de corta duración, la transformada madre que mejor se adapta es la db4.

El modulo máximo de la transformada de wavelet contiene información sobre el momento en el que aparece la falta. De esta forma, la posición exacta en la que aparece el pico de la onda viajera ocurre donde el coeficiente del modulo de la transformada tiene un valor máximo. De acuerdo con este principio, para determinar el inicio del pico de la onda viajera hay que encontrar el máximo modulo. Una vez se ha realizado la transformación, se tiene que buscar el modulo máximo de los coeficientes de detalle.

3.5 Transformación de Clarke

Para analizar sistemas de potencia usando las corrientes y tensiones de fase, a menudo se confía en un conjunto auxiliar de variables obtenidas desde las corrientes de fase y tensiones a través de la transformación lineal que se haya elegido. Estas transformaciones son seleccionadas para simplificar el análisis tomando ventaja de relaciones específicas entre los parámetros trifásicos del sistema o relaciones específicas entre las señales de fase. La transformación más común utilizada en análisis de sistemas de potencias para análisis de falta es la de componentes simétricas. Sin embargo, las componentes simétricas se aplican a fasores tanto de corriente como de tensión y no a los valores instantáneos de tensión y corriente de onda viajera.

Otra posibilidad para analizar transitorios de ondas viajeras a parte de la transformada Wavelet, vista en el apartado anterior, es la transformada de Clarke. Se puede definir los componentes de la fase de corriente, referidos a la fase A mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = T_c^{-1} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (28)$$

Las tres componentes están referidas a las ondas de corriente propagadas a través de los conductores aéreos (I_α, I_β) y a la onda de corriente que se propagaría por tierra. Si las corrientes iguales fluyen por los conductores A, B y C y vuelven a tierra, solo la componente cero está excitada. Si todas las corrientes fluyen en la fase A y la mitad vuelve en B y la otra mitad en C, entonces solo la componente alfa está excitada. Si todas las corrientes fluyen por la fase B y regresan en C, entonces solo la componente beta está excitada.

Los componentes de Clarke calculados con referencia de la fase A trabajan correctamente para faltas monofásicas a tierra, entre la fase A y tierra, y para faltas bifásicas entre las fases B y C, pero no trabajarán óptimamente para otro tipo de faltas.

Para cubrir todo tipo de faltas, se puede utilizar los tres conjuntos de componentes de Clark, con referida a la fase A, B o C.

$$\begin{bmatrix} I_0^A \\ I_\alpha^A \\ I_\beta^A \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} I_0^B \\ I_\alpha^B \\ I_\beta^B \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} I_0^C \\ I_\alpha^C \\ I_\beta^C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (31)$$

La necesidad de tener que trabajar con tres conjuntos de componentes hace que la transformada de Clarke sea menos conveniente frente a las componentes simétricas a la hora de analizar el dominio de la frecuencia, pero, debido a que no se pueden utilizar las componentes simétricas para analizar transitorios de ondas viajeras se tiene que confiar en las componentes de Clarke, a pesar de la necesidad de tres series de cálculo.

Las componentes alfa son apropiadas para analizar ondas viajeras provocadas por faltas monofásicas a tierra y los componentes de beta son para faltas bifásicas.

Para cada secuencia los valores de impedancia característica, atenuación y dispersión son diferentes. Como ya se sabe la velocidad de propagación, la dispersión y la atenuación son parámetros claves cuando se selecciona el modo para la localización de la falta por onda viajera.

La secuencia cero es la menos apropiada para la localización de faltas por onda viajera, debido a que tiene mayor atenuación y dispersión que las ondas de corriente propagadas a través de los conductores, debido a mayores pérdidas en la tierra que en los conductores. Esto deja 6 componentes de Clarke aéreos para trabajar con: alfa y beta, cada uno referido a las fases A B y C.

3.6 Determinación del tiempo de llegada de la onda viajera al relé

Como se ha explicado anteriormente, las ondas viajeras son señales de alta frecuencia y su frecuencia fundamental se encuentra en el rango de 20 kHz a 2 MHz. Una vez que el relé detecta la onda viajera, el primer paso para determinar con precisión el tiempo de llegada es utilizar un filtro paso banda para eliminar las frecuencias del sistema a 50 Hz y los armónicos. Un filtro paso banda tiene como función dejar pasar el contenido frecuencial que se encuentre dentro de una ventana centrada en la frecuencia central del estudio a realizar, este margen vendrá determinado por dos frecuencias de corte especificadas de antemano. El espacio que forman la frecuencia inferior y la frecuencia superior definirán el ancho de banda del filtro. Para nuestro caso las frecuencias de corte inferior y superior valdrán 20 kHz y 2 MHz respectivamente, de modo que las señales obtenidas a la salida del filtro tendrán una frecuencia dentro del intervalo anterior. En los siguientes apartados se ampliará la información sobre cómo se determina la llegada de la onda viajera y el tipo de filtrado que se realiza. La forma ideal de la señal, una vez

pasado el filtro, de las ondas viajeras debidas a faltas a lo largo de la línea tiene el aspecto que se muestra en la siguiente figura:

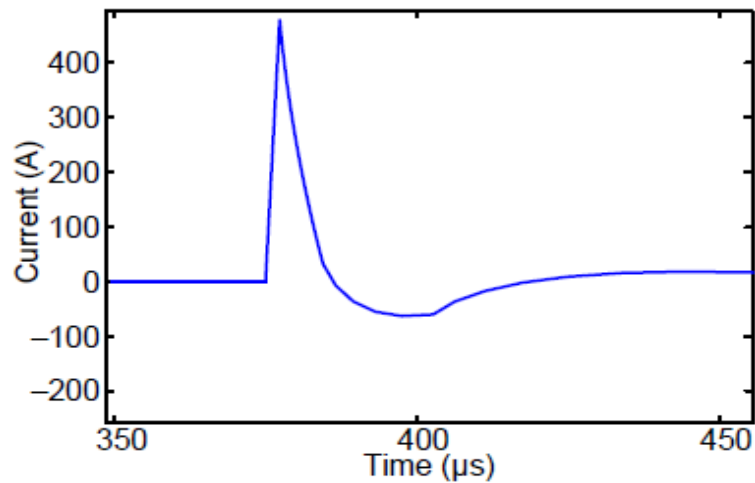


Ilustración 15: Respuesta a la salida del filtro utilizando la corriente de la onda viajera

Sin embargo, muy pocas veces se da una falta ideal. De tal manera que la respuesta al pasar por el filtro, para la corriente de una onda viajera sería más o menos la siguiente:

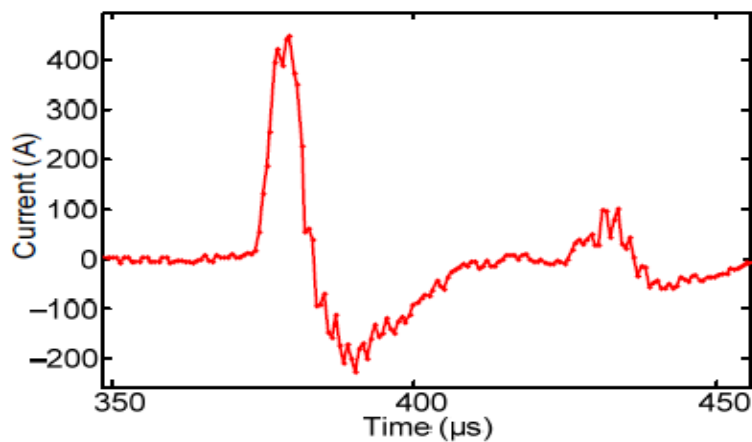


Ilustración 16: Corriente de la onda viajera capturada tras una falta en la línea real

En la ilustración 16 se puede observar como las formas de onda que se producen cuando la falta no es ideal dificultan la determinación del tiempo de llegada.

Una vez que sabemos cuál es la forma de la corriente de la onda viajera que tenemos que detectar, se procede a explicar que es lo necesario para precisar el tiempo de llegada. Existen diferentes métodos para su determinación, se explicarán y más tarde se describirá el proceso que se ha seleccionado.

3.6.1 Generar una marca de tiempo en el pico de la onda viajera

Como se ha explicado anteriormente, el pico de la onda no está bien definido, ya que la onda no es ideal. Pueden existir varios máximos debido a oscilaciones en los cables secundarios o reflexiones rápidas debido a discontinuidades próximas. Además, la frecuencia de muestreo causa un error importante si se considera el dato de magnitud máxima como el pico. Realizando un filtrado del ajuste de la curva e interpolando se puede solucionar el problema anterior pero el problema de una mala definición del máximo de la onda de corriente hará que pueda existir cierto error en la determinación del pico.

3.6.2 Generar una marca de tiempo en el inicio de la onda viajera

Otro método se basa en realizar una marca de tiempo del momento en el cuál la onda viajera parte de cero. Para ello se realiza el ajuste de una línea en el flanco ascendente y se calcula la intersección con el eje del tiempo. También se puede calcular el tiempo, cuando la señal está a una cierta distancia o umbral, para después ser corregido mediante una estimación del tiempo que tarda la señal desde cero hasta el umbral aplicado.

El problema de este enfoque se encuentra en la variación de la determinación del instante en el que se produce el comienzo del frente de la onda viajera, como se muestra en la ilustración 17. Dependiendo del fragmento del flanco que se utiliza para el ajuste de la línea se obtienen considerables diferencias en el tiempo de llegada medido.

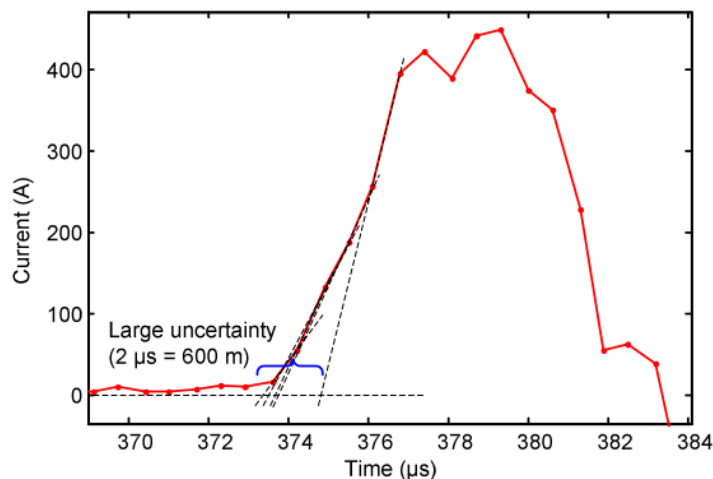


Ilustración 17: Variación del tiempo de llegada dependiendo del ajuste de la línea del flanco ascendente

Aunque se aplique a la onda de corriente un filtro de paso bajo, con el fin de eliminar las distorsiones indeseadas y suavizar la forma de onda el problema sigue persistiendo, como se expone en la ilustración 18.

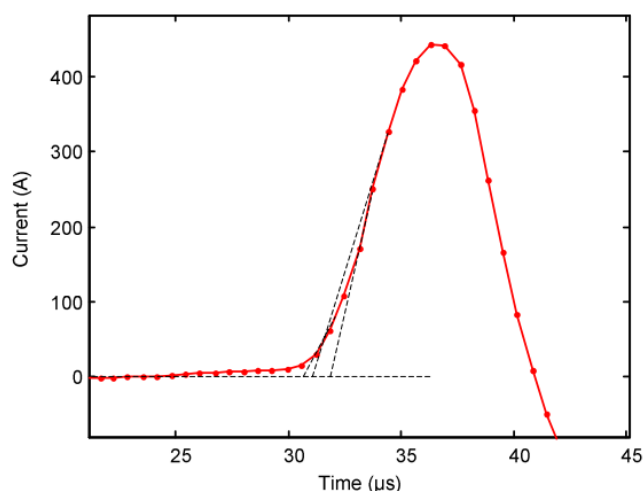


Ilustración 18: Salida de la onda de corriente del filtro de paso bajo

Este método ha sido utilizado en la práctica en el sistema escocés en redes de 275 y 400 kV [10]. Sin embargo, existe un método más simple y con mayor precisión para la determinación del tiempo de llegada, este método es el del diferenciador.

3.6.3 Método del diferenciador

Para determinar el tiempo de llegada vamos a utilizar el método del diferenciador. Es un método que se comporta bien ante los efectos de la distorsión de las ondas y ya ha sido probado en campo, en abril de 2012 la BPA, la administración de potencia de Bouneville, instaló dos relés localizadores de falta por onda viajera basado en el método de los dos extremos en la línea de 161 kV entre Goshen y Drummont [11].

En la siguiente figura se muestra su correspondiente diagrama de bloques. Se utiliza la corriente de la onda viajera y se hace pasar a través de un filtro de paso bajo, esto reduce los efectos de las distorsiones y hace que el borde ascendente se suavice. Esto puede parecer contrario al objetivo de determinar el tiempo de llegada, sin embargo, hace posible el proceso de interpolación del tiempo. Una vez ha eliminado las señales de baja frecuencia, la onda se deriva, convirtiendo el escalón de corriente en un suave pulso, la onda resultante tiene un pico en donde la pendiente es más pronunciada, este punto es relativamente insensible a los cambios de amplitud, encontrándose en la mitad de la forma de onda, independientemente de su amplitud. En la ilustración 20 podemos observar cual es la evolución de la onda de corriente de la onda viajera a su paso por cada uno de los elementos que forman el algoritmo para la determinación del tiempo de llegada de la onda viajera al extremo de la línea.

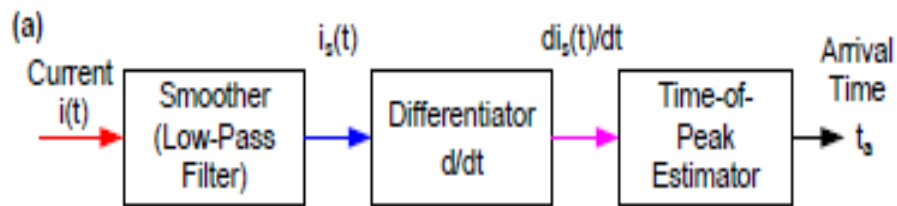


Ilustración 19: Diagrama de bloques del método del diferenciador

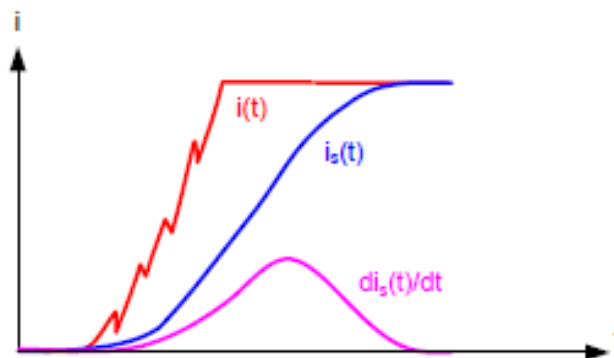


Ilustración 20: Evolución de la onda de corriente

En la siguiente figura, se puede ver lo comentado anteriormente, esta muestra en detalle la salida derivada e indica los tiempos en los que se tomaron las muestras. La intersección de las líneas es el punto donde se realiza la medición de t_a .

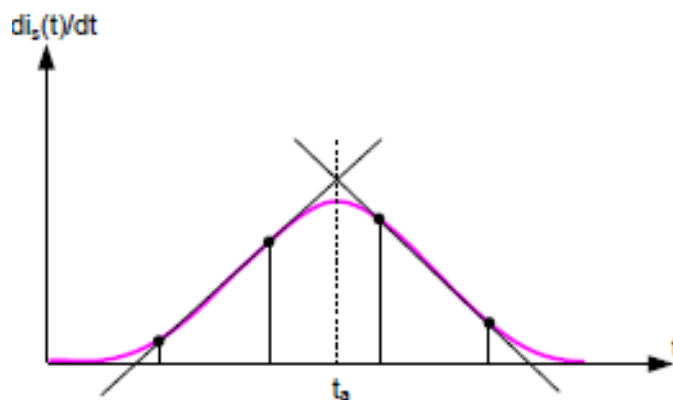


Ilustración 21: Estimación del tiempo de llegada

Cuando se utilizan filtros para suavizar la derivada de la corriente, la corriente tiene forma de parábola, como se puede ver en las ilustraciones 21 y 22. Por este motivo se utiliza un método de interpolación basado en parábola para calcular el tiempo de llegada de la onda viajera. El algoritmo de interpolación selecciona algunas muestras previas al pico y otras posteriores al pico. Además, utiliza el método de ajuste por mínimos cuadrados para ajustar una parábola a

los puntos seleccionados y calcula el tiempo de llegada (t_a) de la onda viajera, utilizando para ello la mejor parábola de ajuste (ver ilustración 22).

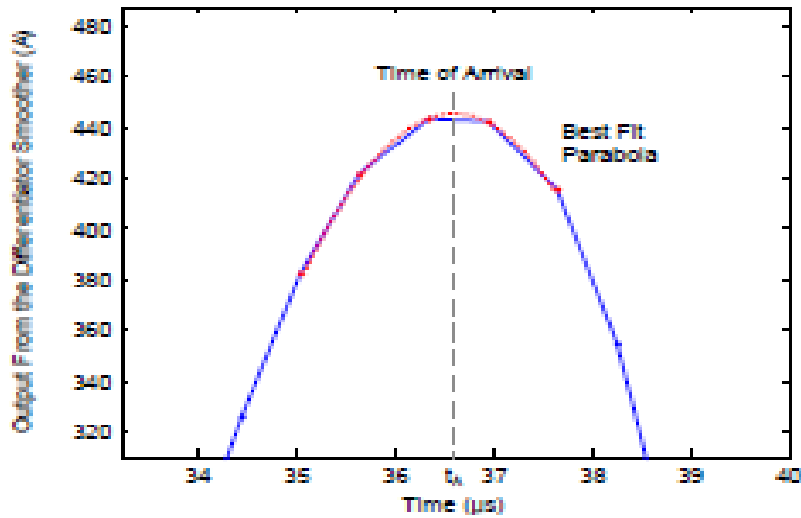


Ilustración 22: Estimación del tiempo de llegada basándose en la mejor parábola de ajuste

Este método es simple y además robusto. Proporciona el tiempo de llegada con una exactitud superior a 0.2 microsegundos (error en torno a 30 metros).

3.7 Compensación por la dispersión

El algoritmo anterior no se ve afectado por la magnitud, pero sí por la pendiente del flanco de subida. El algoritmo determina el tiempo del punto medio de los flancos de subida en cada extremo de la línea dando como resultado de esta operación, dos errores diferentes e_1 y e_2 . Esto se puede observar en la ilustración 23.

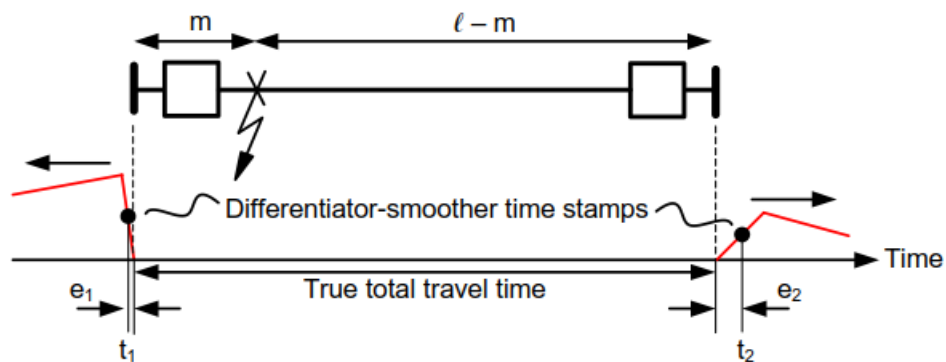


Ilustración 23: Causas de la determinación de errores diferentes en cada extremo debidas a la dispersión.

Se puede compensar el error causado por la dispersión si se conoce la tasa de dispersión, medida en nanosegundos por longitud de línea. Para ello, primero se calcula la distancia de la falta sin tener en cuenta la dispersión. Después se estima la duración de los flancos de subida en las

ondas de corriente en ambos extremos de la línea, basándose, para ello en la localización de falta desde cada extremo y en la tasa de dispersión, esta es dada por el tipo de falta. Una vez realizada esta estimación, se corrige los tiempos durante la mitad del tiempo del flanco de subida, de tal manera que los nuevos tiempos se calculan como la diferencia entre el tiempo original y el error medido en ese terminal:

$$t_{1Corr} = t_1 - e_1 \quad (32)$$

$$t_{2Corr} = t_2 - e_2 \quad (33)$$

Tras la corrección de los tiempos se vuelve a repetir los cálculos para la locación de la falta. Opcionalmente se pueden repetir los pasos de estimación de duración de los flancos y su corrección varias veces para que la precisión mejore.

Para que la compensación de la dispersión sea precisa se requiere de los datos específicos de configuración de la línea. Ya que la tasa de dispersión puede ser diferente para cada línea. Cuando se asume una relación lineal entre la dispersión y la distancia recorrida, se logra la compensación, aplicando una velocidad de propagación ligeramente ajustada y utilizando la misma ecuación para la localización por onda viajera. Refiriéndose a la ilustración 23, se pueden escribir las ecuaciones (34) y (35), donde v es la velocidad de propagación actual.

$$t_1 = \frac{m}{v} + e_1 \quad (34)$$

$$t_2 = \frac{l - m}{v} + e_2 \quad (35)$$

Asumiendo que los errores de la determinación del tiempo de dispersión son proporcionales a la distancia recorrida, se puede escribir la ecuación (36), en la cual D es la dispersión por unidad de distancia.

$$e_1 = m D \quad (36)$$

$$e_2 = (l - m) D \quad (37)$$

Sustituyendo las ecuaciones (36) y (37) en (34) y (35) y resolviendo para m , se obtiene la ecuación (38):

$$m = \frac{1}{2} \left[l + (t_1 - t_2) \frac{v}{1 + D v} \right] \quad (38)$$

Se puede observar que la ecuación (38) es la ecuación clásica de la localización de falta por onda viajera (23), con la velocidad de propagación ajustada de la siguiente manera:

$$V_u = \frac{V_{Real}}{1 + D V_{Real}} \quad (39)$$

El valor correcto de la velocidad es ligeramente más bajo que el de la velocidad de propagación actual debido a que $D > 0$. El valor de D puede depender del tipo de falta, haciendo las correcciones ligeramente diferentes para faltas de fase o a tierra.

Medir la velocidad a través de un test de energización de línea, hace que la medición velocidad de propagación de la onda viajera este corregida por el efecto de la dispersión, asumiendo que la tasa de dispersión es la misma en toda la longitud de la línea.

3.8 Compensación secundaria de la longitud del cable

En general, los cables que unen los secundarios de los transformadores de corriente a los relés de los extremos de la línea introducen un error adicional en el tiempo medido. Se mejora la precisión compensando el tiempo de propagación desde el primario del transformador hasta el terminal del relé usando la longitud y la velocidad de propagación del cable secundario.

Por ejemplo, en el caso de un relé con 100 metros de cable secundario y asumiendo la velocidad de propagación, como la típica en un cable de un transformador de corriente, 0.7 veces la velocidad de la luz, la llegada de la onda viajera desde el transformador de corriente hasta el relé sería $\frac{100}{0.7 \cdot 3 \cdot 10^8} = 0.476 \text{ microsegundos}$. Si no se realiza una compensación de este tiempo adicional, podría producirse un error en la localización de la falta de $0.5 \cdot 0.476 \cdot 3 \cdot 10^8 = 71.4 \text{ m}$.

La siguiente ecuación muestra el tiempo de llegada estimado de la onda viajera t_{1Corr} usando la compensación del cable secundario:

$$t_{1Corr} = t_1 - \frac{l_{CT}}{V_{Sc}} \quad (40)$$

Siendo t_1 el tiempo de llegada de la onda viajera, l_{CT} la longitud del cable secundario y V_{Sc} la velocidad en el cable secundario.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS BASADOS EN REGISTRADORES DE EVENTOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALTAS

En este capítulo se van a analizar los métodos basados en registros de eventos, estos son similares a los métodos explicados en el capítulo 3. Se explicarán los mecanismos para detectar el inicio de los transitorios y los pasos que se realizan para llegar a la localización de la falta.

4.1 Introducción a los métodos basados en registros de eventos

Estos métodos basados en la teoría de ondas viajeras utilizan los datos de tensión o corriente capturados por los registradores de eventos instalados en ambos extremos de la línea para calcular la localización de la falta. Son métodos más simples que los utilizados en relés con protección de línea por onda viajera, ya que la estimación de la localización de la falta no se lleva a cabo en el propio relé, si no en un sistema independiente, a través de los datos capturados por los registradores de evento.

Un registrador de eventos (DFR) es un dispositivo con la capacidad de capturar eventos de onda viajera y tomar los datos tanto de tensión como de corriente de dichos eventos. Los DFR trasladan las señales capturadas a un osciloscopio, donde se analiza la onda viajera. Como son métodos basados en ambos extremos de línea, es necesario la utilización de un GPS para sincronizar las ondas de los osciloperturbógrafos de ambos extremos. A continuación se muestra un esquema de la aplicación del procedimiento para la estimación de la localización de la falta.

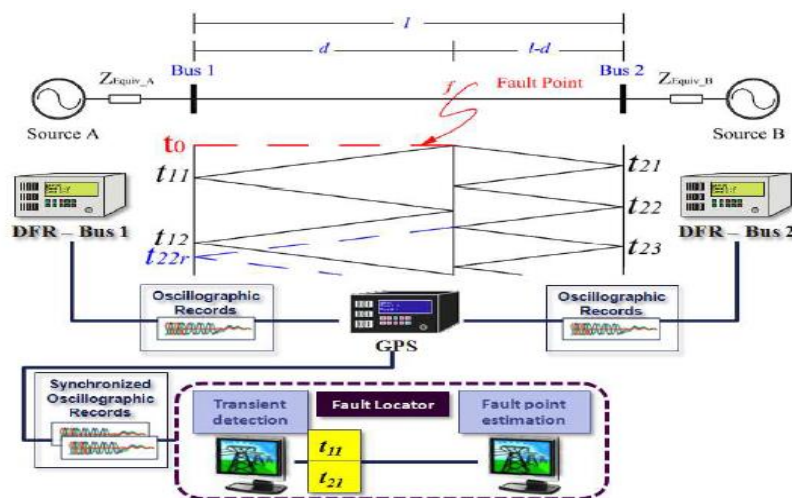


Ilustración 24: Esquema del método de doble extremo para la localización de la falta a través de los DFR

Donde: t_{11} es el instante inicial del transitorio en el Bus 1, t_{21} es el instante inicial del transitorio en el nudo 2, t_{12} es el instante de llegada de la onda reflejada en el Bus 1, mientras que t_{22} y t_{23} son los instantes de llegada de las ondas reflejadas en el Bus 2, t_{22r} es el instante de llegada de la onda refractada en el Bus 1, l es la longitud de la línea y d la distancia al lugar donde se produce la falta.

La idea principal de estos métodos es la determinación del instante inicial del transitorio en los extremos monitorizados, igual que ocurre en los métodos basados la localización de falta por onda viajera. Los métodos de localización de falta por registrados de eventos están basados en el análisis de las formas de onda de tensión guardadas por los DFR en los dos terminales de la línea protegida. Se trata de métodos que necesitan los datos de ambos extremos y por lo tanto un canal de comunicaciones entre ellos, para sincronizar las medidas de ambos DFR se debe utilizar un GPS de tal modo que se asegure que las medidas de tensión estén en la misma base de tiempos y que el instante de inicio del transitorio sea correctamente obtenido. De este modo, solo se utiliza la onda viajera incidente evitando las ondas reflejadas desde el punto de falta.

El algoritmo consiste en dos pasos principales; la detección del transitorio, idea principal, y la localización del punto de falta. Para el primero, es necesario detectar la onda viajera incidente en ambos extremos para poder medir los tiempos t_{11} y t_{21} . A continuación se obtiene la localización del punto de falta mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21})}{2} \quad (41)$$

Donde v es la velocidad de propagación de la línea. Se puede apreciar que la ecuación (41) es la misma que la ecuación (23), utilizada para el cálculo de la localización de la falta para el método basado en ondas viajeras de dos extremos.

A continuación, se va a proceder a explicar detalladamente la transformada utilizada para la detección del transitorio, para este método utilizaremos la transformada de Park. Además, también se va a exponer cada una de las etapas que se llevan a cabo para calcular la localización de falta por este método. El método está dividido en cinco pasos: adquisición de los datos de tensión utilizando los registradores de eventos de ambos extremos, cálculo de un fasor ortogonal de tensión en un marco de referencia estático, cálculo de un fasor ortogonal de tensión en un marco de referencia rotativo, determinación del instante inicial del transitorio de la onda viajera y por último cálculo de la localización de la falta.

4.2 Transformada de Park

La transformada de Park es un método que se utiliza para la detección de transitorios en el conjunto de la ingeniería eléctrica y está basada en el trabajo presentado por R. H. Park en

Estados Unidos en 1929 [20]. Se ha utilizado principalmente en investigaciones sobre máquinas síncronas con polos salientes donde las inductancias variables en un marco de referencia estático son vistas como inductancias constantes cuando el marco de referencia gira a la velocidad síncrona. Para nuestro caso, se utiliza el marco de referencia giratorio para eliminar las señales de frecuencia de la onda de tensión permitiendo la detección del tiempo del transitorio. En la siguiente ilustración se muestra la analogía entre la aplicación en máquinas eléctricas y la detección del transitorio.

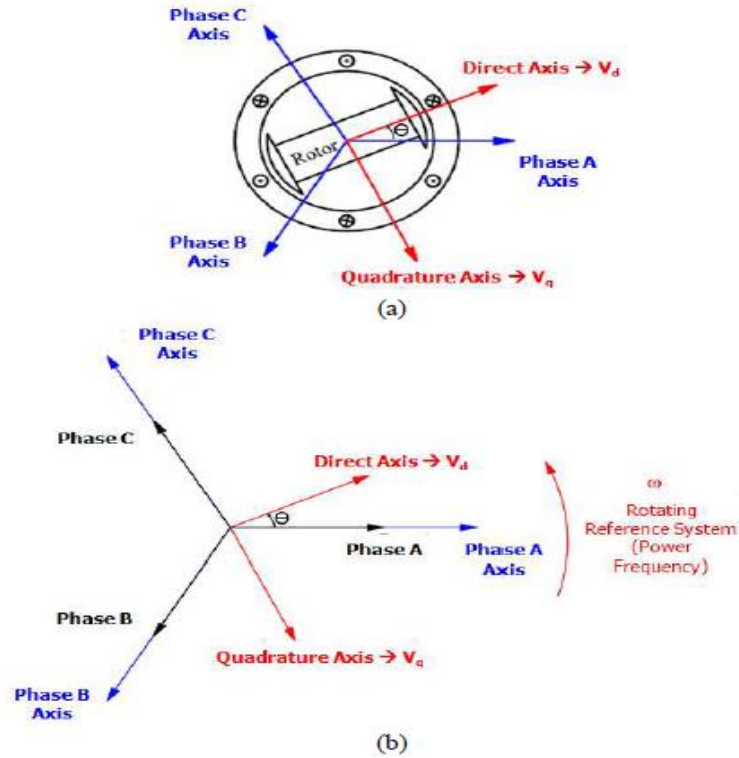


Ilustración 25: Aplicación de la transformada de Park en (a) máquinas eléctricas y (b) detección de transitorio

Para operaciones en condiciones normales en el sistema de potencia las señales de frecuencia son calculadas y si ocurren transitorios, se obtienen las señales oscilatorias. Estas señales se denominan componentes de eje longitudinal y de eje transversal y serán representadas como V_d y V_q . Ambas componentes pueden ser usadas para la detección del transitorio, pero se considerará únicamente V_d .

Para casos de alta impedancia, los coeficientes de V_d presentan una gran atenuación. Con el objetivo de aumentar la sensibilidad del algoritmo se calcula un coeficiente de diferencia (c_{dif}) utilizando la aproximación de Taylor:

$$c_{dif}(i) = \frac{C(i) - V_d(i-1)}{\Delta t} \quad (42)$$

Donde V_d es la componente del eje longitudinal, i es el número de muestra y Δt es el tiempo entre ambas muestras.

Se va a utilizar c_{dif}^2 para detectar el instante de inicio del transitorio en los terminales monitorizados. Este término hace que la detección del transitorio sea más robusta debido a que el coeficiente relacionado con la señal del transitorio está amplificado y los coeficientes relacionados para unas condiciones del sistema normales se mantienen en magnitudes bajas. A continuación se muestra un ejemplo de detección del transitorio usando la transformada de Park:

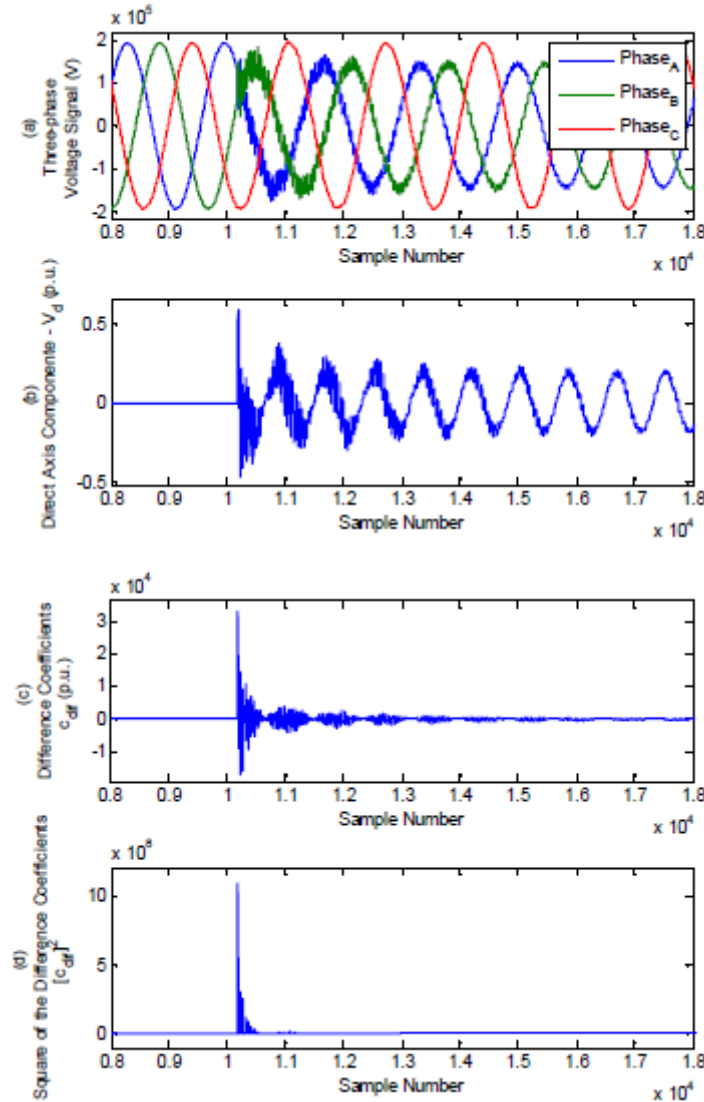


Ilustración 26: Detección de transitorio utilizando la transformada de Park para una falta bifásica a tierra

En la ilustración 26 se puede observar cómo va evolucionando el transitorio cuando se utiliza la transformada de Park. En la primera parte, (a), se puede observar las señales de tensión de las tres fases, después en (b) se obtiene la componente de eje longitudinal V_d , se continúa con el coeficiente de diferencia c_{dif} (c) y para finalizar se aplica el cuadrado del coeficiente de diferencia, c_{dif}^2 para obtener el transitorio final (d).

4.3 Adquisición de los datos de tensión utilizando los registradores de eventos de ambos extremos

Como se ha comentado anteriormente, solo se van a tomar muestras de la tensión del transitorio. Una de las características más importantes está relacionada con la frecuencia de muestreo utilizada por los DFR. El ratio de muestreo de los DFR comerciales se encuentra entre los 15 kHz y los 20 kHz, esto supone una limitación para los métodos de localización de falta por onda viajera, debido a que el ratio es bajo. Manteniendo fijo el número de muestras por ciclo, tiempos de paso pequeños serían apropiados para reducir los errores producidos por los métodos numéricos de integración.

De todos modos, aunque exista es limitación, los algoritmos basados en onda viajera son más fiables que los basados en la componente fundamental de frecuencia.

4.4 Cálculo de los fasores ortogonales de tensión en un marco de referencia estático.

Las variables de entrada de la transformada de Park son fasores ortogonales obtenidos mediante la transformación de Clarke la cual calcula las ondas de tensión a través de los conductores aéreos (V_α y V_β) y la onda de tensión que se propaga por tierra (V_0).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (43)$$

En nuestro caso solo se utilizarán las ondas de tensión a través de los conductores aéreos porque su velocidad de propagación es mayor que la de las ondas que se propagan por tierra. V_α y V_β son utilizadas como variables de entrada de la transformada de Park para obtener los fasores de tensión ortogonales en un marco de referencia rotativo. Cabe destacar, que la transformación de Clarke obtiene los fasores de tensión ortogonales en un marco de referencia estático, de modo distinto a otras aplicaciones donde se utiliza para desacoplar el sistema de tensión trifásico. Por lo que, la aplicación de este método no depende del esquema de transposición de la línea de transmisión, por ejemplo, puede ser aplicado a líneas sin transposición de fases.

4.5 Cálculo de los fasores ortogonales de tensión en un marco de referencia rotativo

Este es el paso más importante en el algoritmo propuesto, porque hace posible el análisis de las secuencias directa e inversa utilizando un sistema de referencia rotativo, permitiendo la correcta detección del transitorio. La transformación de Park es aplicada a las señales de tensión de salida de la transformación de Clarke para obtener la tensión V_d , utilizada para determinar la localización de la falta.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(w.t + \theta) & -\sin(w.t + \theta) \\ \sin(w.t + \theta) & \cos(w.t + \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (44)$$

Donde: w es la frecuencia angular del sistema, t es el tiempo del reloj de los DFR sincronizados por GPS y θ es el ángulo entre V_d y el fasor de tensión de la fase a (ilustración 25)

Aparentemente, la no alineación de V_d con el fasor de tensión de la fase A puede parecer un problema. Como se puede observar en la ilustración 25, si θ es mayor que cero, una señal constante V_d es obtenida cuando el sistema opera en condiciones normales y, entonces, el transitorio puede ser detectado incorrectamente. En este caso, los coeficientes c_{dif} solucionan el problema porque, incluso obteniendo señales constantes distintas a cero, cada coeficiente c_{dif} estaría cerca de cero. Por lo tanto, el método propuesto no requiere alineación entre V_d y el fasor de tensión de la fase A para detectar el transitorio correctamente.

Otra característica favorable de este método es que solo se utiliza las muestras de tensión y corriente para calcular los coeficientes de V_d , simplificando la implementación del método y haciendo posible la localización de la falta casi inmediatamente después de que ocurra. Otras técnicas como las vistas anteriormente utilizan más de una muestra de tensión o corriente de cada fase para calcular los coeficientes para el análisis del transitorio del sistema, haciendo que la localización de la falta sea un proceso más complejo.

4.6 Detección del instante inicial del transitorio

En el método de localización desde los dos extremos, se debe calcular el coeficiente c_{dif}^2 de ambos extremos de la línea. El análisis de este coeficiente permite la identificación del número de muestra en la cual ocurre el inicio del transitorio. De modo que es necesario obtener el inicio del transitorio, en segundos, para poder utilizar la ecuación (41) y así calcular la distancia a la falta. Los valores de c_{dif}^2 con una magnitud por debajo de un umbral preestablecido se eliminan y, por lo tanto, los coeficientes relacionados con el ruido y la oscilación de baja frecuencia son ignorados. Como consecuencia de lo anterior, solo se consideran los valores c_{dif}^2 relacionados con los transitorios por la aparición de la falta.

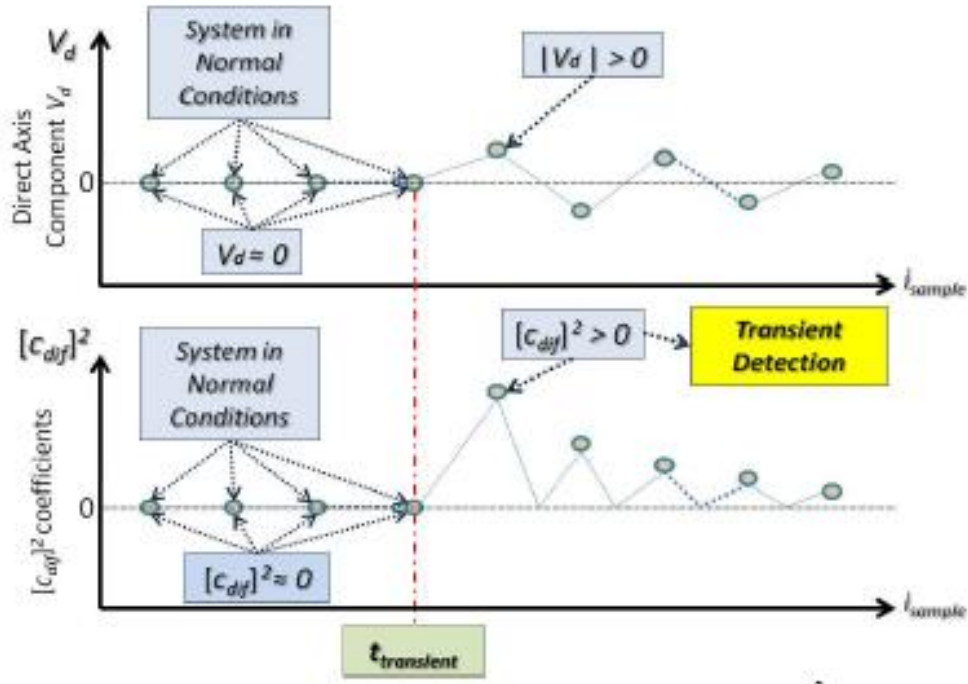


Ilustración 27: Detección del instante inicial del transitorio mediante el análisis por el coeficiente c_{dif}^2

Como se muestra en la ilustración 27 el primer valor diferente a cero que toma c_{dif}^2 ocurre en la muestra anterior del inicio del transitorio, si se considera F_s como la frecuencia de muestreo utilizada por los DFR, el instante inicial del transitorio, $t_{transient}$, puede ser calculado siempre y cuando c_{dif}^2 sea mayor que cero:

$$t_{transient} = \frac{(i - 1)}{F_s} \quad (45)$$

Donde: $t_{transient}$ es el tiempo en el que ocurre el instante inicial del transitorio, en segundos; c_{dif}^2 es la diferencia de coeficientes calculado desde V_d e i es el número de muestra.

4.7 Estimación de la localización de la falta

Para detectar los instantes iniciales de los transitorios en ambos extremos de la línea, t_{11} y t_{21} (ilustración 24), se utilizan las señales de tensión de ambos extremos de la línea de transmisión.

Una vez se han obtenido los tiempos t_{11} y t_{21} y se conoce la velocidad de propagación la línea aérea, se utiliza la ecuación (41) para calcular el punto de localización de la falta.

A continuación, en la ilustración 28, se mostrará cómo se detectan el tiempo de inicio de los transitorios de cada uno de los extremos. En a, se observan las señales de tensión de las tres fases desde el extremo L de la línea, mientras que en b, se observan las mismas señales de tensión desde el extremo opuesto. Para los casos c y d, se observan las señales del coeficiente c_{dif}^2 desde uno de los extremos de la línea.

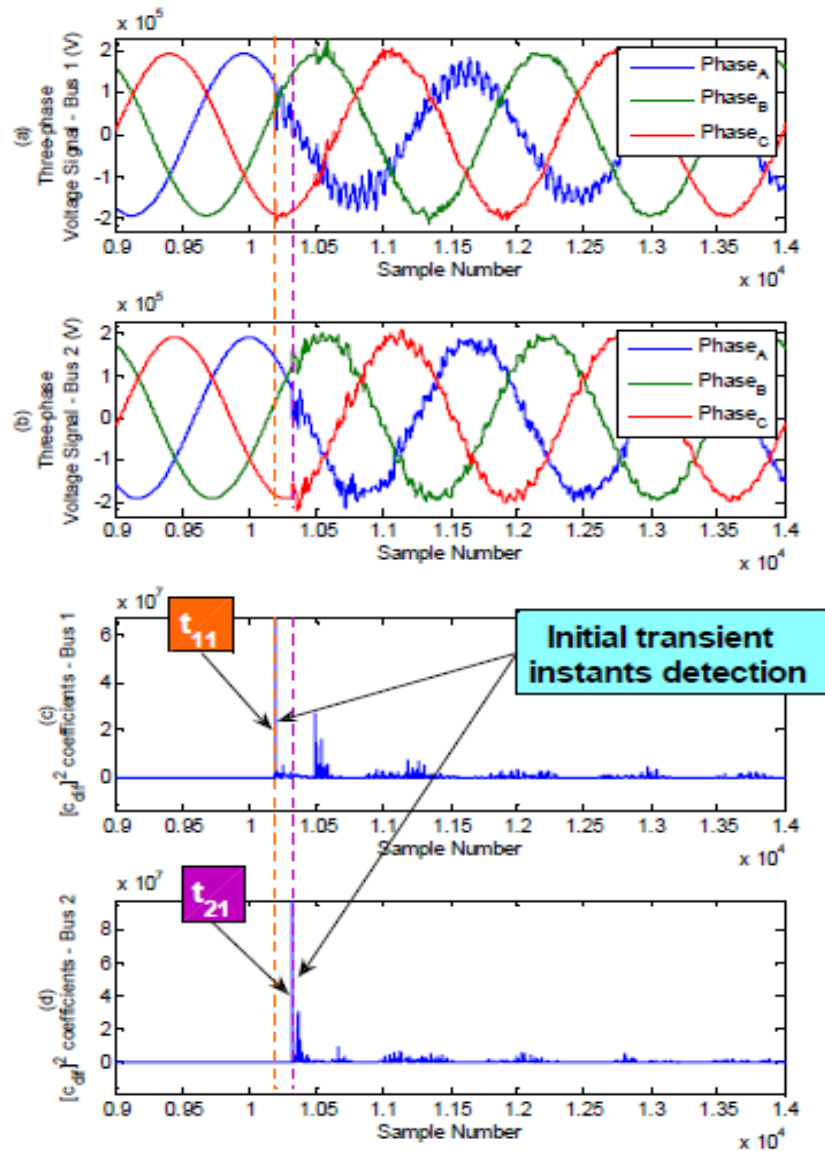


Ilustración 28: Detección de transitorio en ambos extremos de una línea mediante el análisis c_{dif}^2

CAPÍTULO 5

MÉTODOS TRADICIONALES PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALTAS

Actualmente se utilizan varios métodos para la localización de falta: los basados en onda viajera, explicados en el capítulo 2, los basados en registradores de eventos, los cuales se tratarán en el capítulo 4 y los basados en la impedancia. Estos últimos son los denominados métodos tradicionales, los cuales analizaremos en este capítulo.

5.1 Introducción a los métodos tradicionales

A continuación, se van a exponer los métodos de localización de falta tradicionales. Estos algoritmos se fundamentan en la ecuación de línea corta para líneas de transmisión, la utilización de las señales de tensión y corriente medidas desde los relés y la impedancia de la línea que se ve afectada por el aporte de ambos extremos de la línea (infeed).

Para localizar una falta con estos métodos hay que seguir los siguientes pasos:

1. Medir los fasores de tensión y corriente.
2. Extraer las componentes fundamentales de ambos.
3. Determinar los fasores y el tipo de falta que se trata.
4. Aplicar el algoritmo de impedancia correspondiente.

Los métodos de localización de falta pueden necesitar los datos de uno o ambos extremos. Los basados en un único extremo (utilizados en la mayoría de los relés numéricos actuales), utilizan un algoritmo simple, además al no existir la necesidad de los datos del extremo remoto no necesitan ningún canal de comunicación. A excepción de que se quiera comunicar al centro de control o al personal encargado del mantenimiento cual ha sido la estimación de la localización de la falta, en este caso, si es necesario la existencia de un canal de comunicación.

Los localizadores de falta basados en la impedancia de un único extremo calculan la localización de falta desde la impedancia aparente vista desde un extremo de la línea.

Los métodos de localización de falta basados en los dos extremos pueden tener un error más pequeño, pero requieren los datos de ambos extremos de línea. Estos datos deben de ser tomados desde ambos extremos antes de que se pueda aplicar el algoritmo.

En este capítulo se van a explicar los algoritmos más utilizados para la localización de faltas en una línea: algoritmo de la reactancia, algoritmo de Takagi, modificación del algoritmo de Takagi, algoritmo de Sceweitzer y el algoritmo Eriksson.

Un ejemplo de sistema de una línea es el mostrado en la ilustración 29. Para localizar todo tipo de faltas, se tiene que medir las tensiones y corrientes fase tierra de cada una de las fases. Únicamente en el caso particular de faltas fase tierra con impedancia homopolar de la fuente, Z_0 , conocida se puede estimar la localización de la falta utilizando solo los datos de tensiones.

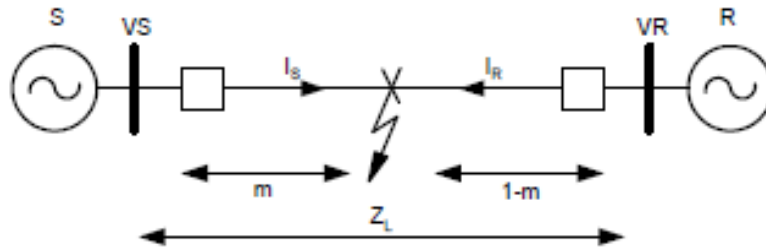


Ilustración 29: Falta en un punto m en un sistema de una línea

A partir de del circuito eléctrico y suponiendo que la resistencia de falta se supone de valor cero, se puede utilizar una de las impedancias calculadas en la tabla para estimar la localización de la falta.

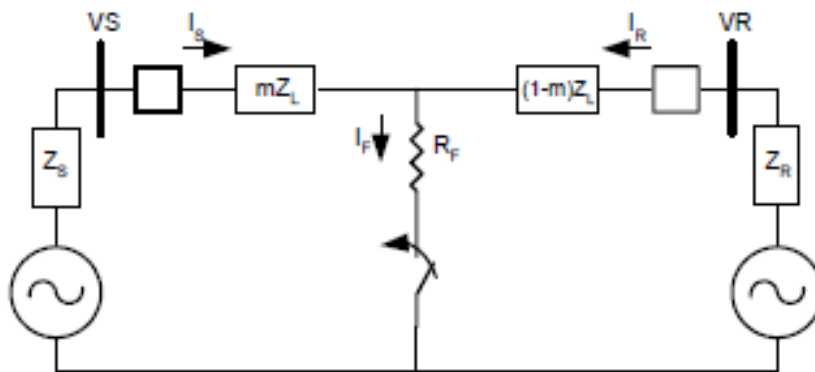


Ilustración 30: Circuito eléctrico correspondiente al sistema anterior

Donde los subíndices a, b y c representan cada una de las fases de la línea mientras que los subíndices 1, 0 representan las secuencias directa y homopolar. Además Z_{IL} es la impedancia de la línea de secuencia positiva, Z_{0L} es la impedancia de la línea de secuencia homopolar, I_0 es la corriente de secuencia homopolar, m es la distancia a la falta por unidad y k es $(Z_{0L} - Z_{IL}) / 3Z_{IL}$.

Tipo de falta	Impedancia de secuencia positiva (Z_{IL})
Fase A- Tierra	$V_a / (I_a + 3 k I_o)$
Fase B- Tierra	$V_b / (I_b + 3 k I_o)$
Fase C- Tierra	$V_c / (I_c + 3 k I_o)$
Fase A- Fase B o Fase A- Fase B- Tierra	V_{ab} / I_{ab}
Fase B- Fase C o Fase B- Fase C- Tierra	V_{bc} / I_{bc}
Fase C- Fase A o Fase C- Fase A- Tierra	V_{ca} / I_{ca}
Fase A- Fase B- Fase C	$V_{ab} / I_{ab} , V_{bc} / I_{bc} , V_{ca} / I_{ca}$

Tabla 2: Impedancias de secuencia directa de la línea dependiendo del tipo de falta en la línea.

Existen una serie de condiciones que pueden causar errores. Las más importantes son: efectos combinados de resistencia de falta y carga, acoplamiento mutuo de la secuencia homopolar, errores de modelado de la secuencia homopolar, sistemas no homogéneos, sistemas con aporte de ambos extremos, inexactitudes en la medición del relé o en los parámetros de la línea.

A continuación, se va a proceder a describir en qué consiste y como opera cada método. Para todos ellos vamos a utilizar como referencia el sistema de una línea de la ilustración 29 y su circuito eléctrico equivalente de la ilustración 30. La diferencia que existe entre los cuatro algoritmos es el tratamiento que se da a la ecuación de la caída de tensión al tratar de realizar la localización de la falta.

5.2 Algoritmo de la reactancia simple

Desde la figura 29, la caída de tensión desde el extremo S de la línea es:

$$V_S = m Z_{IL} I_S + R_F I_F \quad (46)$$

Para faltas a tierra, desde la fase A podemos completar la ecuación anterior, de tal manera que:

$$I_S = I_a + k 3 I_o \quad (47)$$

Donde el termino k está relacionado con la impedancia de la línea y la impedancia homopolar, pudiéndose calcular a partir de la siguiente expresión:

$$k = \frac{Z_{Lo} - Z_L}{3Z_L} \quad (48)$$

El objetivo es minimizar el efecto del término $R_F I_F$. Este método divide todos los términos entre I_S , la corriente medida en el localizador de falta, e ignora el nuevo término $(R_F I_F)/I_S$, debido a que el algoritmo asume una resistencia de falta pequeña. Además, para despreciar el efecto resistivo de la resistencia de falta, el algoritmo utiliza únicamente la parte imaginaria de la ecuación, reemplazando la impedancia Z_{IL} por la reactancia X_{IL} .

Para hacer esto, se utiliza la parte imaginaria, y se calcula el punto m del siguiente modo:

$$\text{Im} (V_S / I_S) = \text{Im} (m Z_{IL}) = m X_{IL} \quad (49)$$

$$m = \frac{\text{Im}(\frac{V_S}{I_S})}{X_{IL}} \quad (50)$$

En este método hay un error nulo si los ángulos de la corriente de falta y la corriente medida en el localizador son iguales, $\angle I_S = \angle I_F$, o si la resistencia de falta es cero $R_F = 0$. Esto sólo ocurre cuando no existe generación en el extremo remoto de la línea o cuando el desfase entre las fuentes de generación de cada extremo sea cero. No obstante, este escenario es poco factible en una línea real. El comportamiento de este algoritmo no es bueno en el momento en el que la resistencia de falta no es cero, debido a que su presencia hace que el error se multiplique por la resistencia de falta, ocasionando así grandes desventajas de este algoritmo respecto a faltas de alta impedancia.

5.3 Algoritmo de Takagi

Este método está basado en la localización de falta a través de la impedancia desde un extremo de línea sin datos de la fuente. El método de Takagi requiere los datos de las condiciones de pre falta y falta. Es una mejora del método de la reactancia simple ya que reduce los efectos del flujo de carga y minimiza el efecto de la resistencia de falta. La caída de tensión desde el extremo S de la línea se calcula cómo:

$$V_S = m Z_{IL} I_S + R_F I_F \quad (51)$$

Utilizando la corriente de superposición I_{sup} para encontrar un término en fase con I_F obtenemos:

$$I_{sup} = I - I_{pre} \quad (52)$$

Donde I es la corriente de cortocircuito e I_{pre} es la corriente en condiciones de pre falta. Multiplicando ambos lados de la ecuación (51) por el conjugado complejo de la corriente de superposición (I_{sup}^*) y utilizando la parte imaginaria, se puede resolver para m .

$$\text{Im} (V_s I_{sup}) = m I_m (Z_{IL} I_s I_{sup}) + R_F I_m (I_F I_{sup}) \quad (53)$$

$$m = \frac{I_m (V_s I_{sup})}{I_m (Z_{IL} I_s I_{sup})} \quad (54)$$

La clave del éxito de este método es que el ángulo de la corriente medida en el localizador de falta, I_s , tiene el mismo ángulo que la corriente I_F . Un sistema ideal homogéneo es un sistema de transmisión donde las impedancias del extremo local y del extremo remoto tienen el mismo ángulo que la impedancia de la línea. En este tipo de sistemas las corrientes I_s y I_F tienen ángulos idénticos. Cuanto más aumente el ángulo entre I_s y I_F , menos precisa será la estimación del lugar donde se produjo la falta.

5.3.1 Modificación del algoritmo de Tagaki

Utiliza la corriente de secuencia homopolar con una corrección en el ángulo. La modificación de Tagaki utiliza la corriente homopolar ($3 I_0$) para faltas a tierra en lugar de la corriente de superposición. Además, otra ventaja de este método es la carencia de necesidad de tener datos de las condiciones de pre falta.

También esta modificación permite la corrección de los ángulos. Si el usuario conoce la impedancia de fuente del sistema, la corriente homopolar puede ser ajustada por un ángulo T para mejorar la estimación de la localización de falta para una línea conocida.

Este ángulo T será válido para la localización de faltas en toda la línea. A continuación, en la ilustración 31 se muestra como calcular este ángulo.

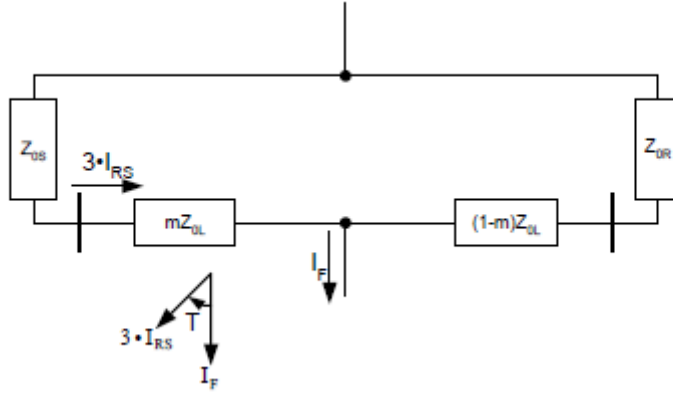


Ilustración 31: Cálculo del ángulo T

$$A\angle T = \frac{I_F}{3 I_{RS}} = \frac{Z_{OS} + Z_{OL} + Z_{OR}}{(1-m)Z_{OL} + Z_{OR}} \quad (55)$$

Una vez se ha calculado el ángulo T, se puede obtener la estimación de la localización de falta, m cómo:

$$m = \frac{I_m(V_S (3 I_{OS})^* e^{-jT})}{I_m(Z_{IL} I_S (3 I_{OS})^* e^{-jT})} \quad (56)$$

5.4 Algoritmo de Scweitzer para líneas cortas

Este algoritmo se basa en la tensión en el punto de falta, V_F , que a través de la ilustración 30 se obtiene:

$$V_F = V_S - m Z_{IL} I_S \quad (57)$$

$$V_F = V_R - (1-m)Z_{IL} I_R \quad (58)$$

Al igualar la ecuación (57) con la ecuación (58) obtenemos la estimación de la localización de la falta:

$$m = \frac{(V_S - V_R + Z_{IL} I_R)}{(Z_{IL} (I_S + I_R))} \quad (59)$$

El resultado de esta ecuación puede ser un número imaginario debido a imprecisiones en las medidas en ambos extremos y en los equivalentes de la línea.

5.5 Algoritmo de Eriksson

Este método utiliza la secuencia negativa desde todos los terminales de la línea para determinar la localización de la falta. Utilizando la secuencia negativa, se eliminan los efectos de la carga en la pre falta, de la resistencia de falta, de la impedancia homopolar mutua y las aportaciones de secuencia homopolar desde las derivaciones de otras líneas. Además, no es necesario precisar la selección del tipo de falta. El ajuste de datos no es requerido porque el algoritmo, que se emplea en cada terminal, usa las siguientes mediciones desde el extremo remoto: I_2 , magnitud de corriente de secuencia negativa y $Z_2 \angle \theta_2$ impedancia calculada de la fuente de secuencia negativa.

Para una falta monofásica a tierra se tiene el circuito de la ilustración 32, donde se puede observar que la tensión de secuencia negativa V_{2F} es la misma cuando se mira desde todos los extremos de la línea protegida.

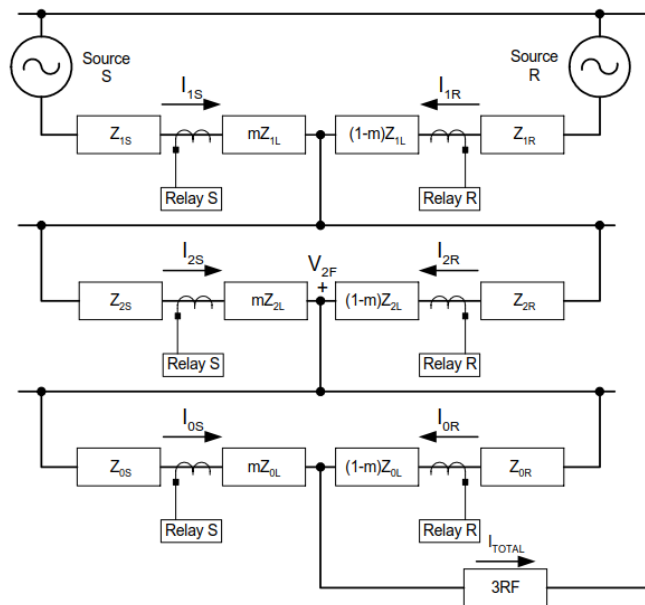


Ilustración 32: Circuito de redes de secuencia para una falta monofásica a tierra.

A partir del circuito anterior se puede obtener la tensión de secuencia negativa desde ambos relés. Mediante el relé S se obtiene:

$$V_{2F} = -I_{2S} (Z_{2S} + m Z_{2L}) \quad (60)$$

Del mismo modo se puede obtener a partir del relé R:

$$V_{2F} = -I_{2R} (Z_{2S} + (1 - m) Z_{2L}) \quad (61)$$

Igualando las ecuaciones anteriores, para eliminar V_{2F} , y despejando se obtiene la expresión:

$$I_{2R} = I_{2S} \frac{(Z_{2S} + m Z_{2L})}{(Z_{2R} + (1 - m)Z_{2L})} \quad (62)$$

Para evitar el ajuste de los datos de los relés S y R, se toma el valor absoluto de ambos lados de la ecuación anterior:

$$|I_{2R}| = |I_{2S}| \frac{(Z_{2S} + m Z_{2L})}{(Z_{2R} + (1 - m)Z_{2L})} \quad (63)$$

Para simplificar la ecuación (63) multiplicamos I_{2S} por el paréntesis y después definimos las siguientes variables:

$$|I_{2R}| = \frac{|(I_{2S} Z_{2S}) + (I_{2S} m Z_{2L})|}{|(Z_{2R} + (1 - m)Z_{2L})|} \quad (64)$$

$$I_{2S} Z_{2S} = a + jb \quad (65)$$

$$I_{2S} Z_{2L} = c + jd \quad (66)$$

$$Z_{2R} + Z_{2L} = e + jf \quad (67)$$

$$Z_{2L} = g + jh \quad (68)$$

Sustituyendo cada una de las variables; (65), (66), (67), (68); dentro de la ecuación (64) obtenemos la siguiente ecuación:

$$|I_{2R}| = \frac{|(a + jb) + m(c + jd)|}{|(e + jf) - m(g + jh)|} \quad (69)$$

Elevando a ambos lados de la ecuación (69), operando y reduciendo términos se da una ecuación cuadrática que tiene como forma:

$$A m^2 + B m + C = 0 \quad (70)$$

Utilizando una solución cuadrática para resolver la ecuación (70) para m , se obtienen los coeficientes de la ecuación:

$$A = |I_{2R}|^2(g^2 + h^2) - (c^2 + d^2) \quad (71)$$

$$B = -2 |I_{2R}|^2 (e g + f h) - 2 (a c + b d) \quad (72)$$

$$C = |I_{2R}|^2 (e^2 + f^2) - (a^2 + b^2) \quad (73)$$

5.6 Estudio sobre los métodos tradicionales

En este apartado se procederá a examinar la precisión de los algoritmos explicados en el capítulo anterior a partir de estudios realizados.

En [17] se analizan los métodos tradicionales para el sistema de transmisión colombiano a través de simulaciones con el programa EMTP/ATP y se saca como conclusiones la determinación de que el algoritmo más preciso y eficaz es el de Erickson, teniendo un comportamiento excelente ante faltas francas, aunque para este tipo de faltas la gran mayoría de los métodos funcionan de forma correcta. Por el contrario, el comportamiento ante faltas de alta impedancia y sobre todo lejos de la subestación no es correcto, teniendo un error grande en ambos casos.

Como análisis adicional en [18] se evalúa la implementación del algoritmo de Takagi para la localización de faltas en el sistema eléctrico de distribución brasileño, donde muestra las grandes desventajas que presenta este algoritmo para la localización de faltas de alta impedancia, además de las dificultades que presenta para adaptarse a cambios en la topología de la red y condiciones de operación. A continuación, se muestran las graficas del tanto por ciento de error frente a la distancia obtenidas en [18] para la localización de una falta monofásica en un sistema de distribución con la totalidad de la carga y con la mitad de carga.

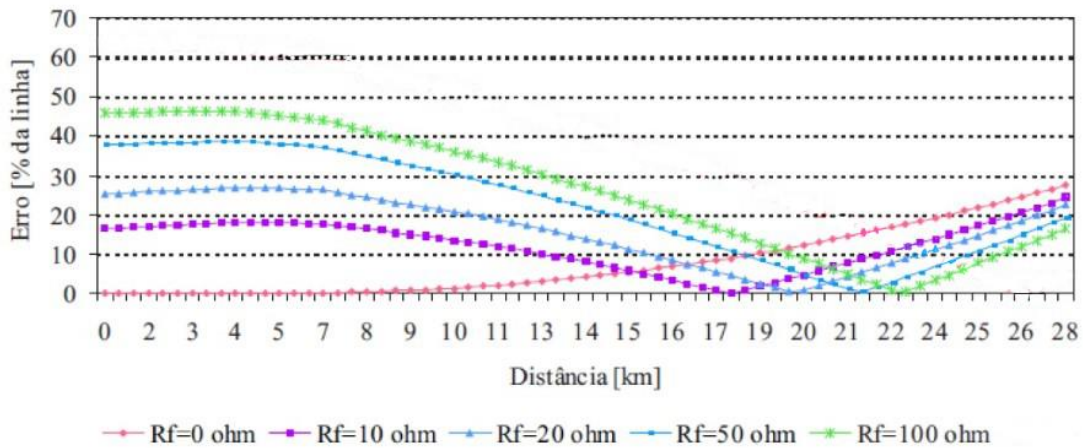


Ilustración 33: Resultado del algoritmo Takagi para faltas monofásicas a tierra con un 100% de carga [18]

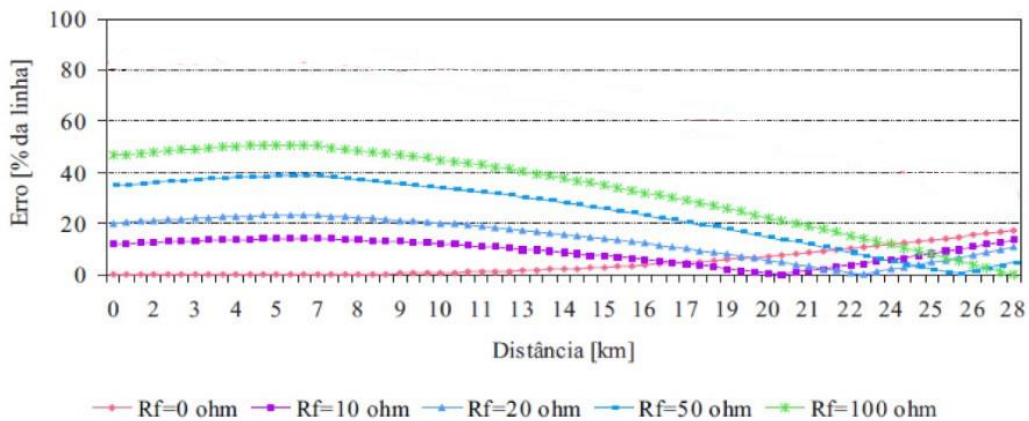


Ilustración 34: Resultado del algoritmo Takagi para faltas monofásicas a tierra con un 50% de carga [18]

A partir de los resultados encontrados en [18] se puede concluir que el método de Takagi no es aplicable en sistemas de distribución debido a los elevados errores encontrados, llegando a valores de más del 50%. Este elevado porcentaje de error puede ser explicado a través de las consideraciones hechas durante la formulación del método de Takagi. Una de ellas es que la línea no tiene pérdidas, en líneas de distribución la resistencia puede llegar a tener el mismo orden de magnitud que la impedancia. También la formulación del método, no considera cargas conectadas a lo largo de la línea. Estos motivos pueden llevar a que el algoritmo tenga errores en la estimación de la localización de la falta.

En lo referente a la localización de faltas en líneas de transporte para el sistema español no ha sido abordado por muchos investigadores, al menos no de manera muy abierta encontrándose pocas publicaciones al respecto.

CAPÍTULO 6

VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN DE FALTA POR ONDA VIAJERA

En este capítulo se van a presentar una serie de ventajas de los métodos de localización de falta por onda viajera, tanto del basado en ambos extremos de la línea como del basado en un único extremo, frente a los métodos tradicionales y a los métodos basados en registradores de eventos. Del mismo modo se comentará los inconvenientes del método de localización de falta por ondas viajeras.

La ventaja principal del método por ondas viajeras es el alto grado de precisión en la localización de falta cuyo error no supera un 2% frente a un error de un 50% que se puede alcanzar con los métodos tradicionales. La determinación del tiempo de llegada es un factor clave para que el error sea mínimo, los métodos de onda viajera pueden proporcionar el tiempo de llegada con una exactitud de 2 microsegundos, que supondrían 30 metros de error. La gran precisión del método provoca un ahorro de costes tanto en partidas técnicas como humanas, ya que no es necesario realizar una revisión de largos tramos de línea en busca del elemento debido al cuál se ha producido la falta, ahorrando el tiempo que supone dicha inspección.

Como ventaja principal frente a los métodos basados en registradores de eventos encontramos el amplio ratio de muestro de frecuencias, para relés que integran la localización por onda viajera este ratio puede llegar hasta los 1.5625 MHz. Mientras que los registradores de eventos comerciales que se encuentran en el mercado suelen tener un ratio entre los 15 y los 20 kHz. Por lo tanto, para una falta en la que se genere un transitorio con una frecuencia más elevada de 20kHz no se podrían tomar las medidas necesarias para calcular la localización de la falta.

Los métodos tradicionales, para proporcionar resultados precisos, necesitan la presencia de la falta durante un par de ciclos. En redes de muy alta tensión debido a los reducidos tiempos de despeje de los interruptores, pueden existir faltas de menos de dos ciclos de duración, aunque los tiempos habituales de despeje estarán habitualmente en 40 ms o, no pudiéndose, en algunos casos, realizar la estimación de la localización de la falta a través de los métodos tradicionales. Por el contrario, no existiría ningún problema para la detección a través de los relés que incorporan la detección por onda viajera porque, como se ha visto anteriormente, para calcular la localización de la falta solo es necesaria la medida del tiempo de llegada de la onda viajera a los extremos de la línea. Además de esta ventaja, los relés con localización por onda viajera tienen un comportamiento excelente ante fenómenos como la no homogeneidad del sistema, el acoplamiento entre circuitos o ante diferentes resistencias de falta, mientras que en los métodos tradicionales aparecen grandes errores, su comportamiento ante faltas de alta impedancia y sobre todo lejos de la subestación no es correcto, teniendo un error grande en ambos casos. También cabe destacar que los tiempos de actuación son menores para los métodos de localización por onda viajera.

La localización de falta por onda viajera por el método basado en un único extremo de la línea, tiene la ventaja de necesitar solo de un único relé, situado en uno de los dos extremos, debido a esto no precisa de un canal de comunicaciones entre relés. Si es necesario un canal de comunicaciones entre el relé y el sistema de gestión si se quiere disponer de los resultados del relé en el centro de control. Los relés que incorporan la localización basándose en un único extremo tienen un precio superior a los que se basan en ambos extremos de la línea, pero mediante este sistema se ahorra el coste del canal de comunicación entre relés y el coste del relé del extremo opuesto.

Para relés basados en el método de ambos extremos de línea, cuando la localización de falta por onda viajera es parte del relé diferencial de línea no es necesario cableado secundario adicional ni un equipo de comunicaciones, utiliza el del propio relé para la transmisión de tiempos y señales. Además, si se sustituye un sistema de protección de línea antiguo, por uno de protección con onda viajera, si el sistema inicial contaba con un canal de comunicaciones no hace falta modificarlo, siendo válido para la comunicación entre los relés con la función de localización de faltas por onda viajera. Del mismo modo, todos los dispositivos dedicados a la sincronización del tiempo, explicados en el anexo a, no necesitan ser sustituidos.

El inconveniente más grande que podemos encontrar en los relés que incorporan la localización de falta por onda viajera es la escasez de empresas que tienen en su portfolio un relé que tenga incluido este método. En la actualidad dentro del grupo de empresas más importantes en el área de protecciones, únicamente SEL vende este tipo de relés. En su catálogo se encuentran dos modelos que tienen la funcionalidad de detección de faltas por onda viajera, el T-400L y el 411L, sobre los cuales ya hemos hablado anteriormente.

Existen algunos inconvenientes con respecto a su comportamiento para faltas en las cuales se genera un transitorio de muy baja amplitud, en estos casos la estimación de la localización de la falta que realiza el relé tiene errores importantes.

No es capaz de localizar el punto de falta si en el momento en el que se produce esta, la onda tensión pasa por cero. Es muy raro que esto ocurra, a no ser que se produzca una rotura brusca de los conductores de la línea.

La caída de un rayo en un lugar próximo a la línea provoca la aparición de ondas viajeras por los conductores de la línea. Estas ondas viajeras pueden ser tratadas por el relé como si provinieran de una falta en la línea, calculando así la localización de una falta inexistente.

Los relés con la localización por onda viajera tienen la gran desventaja de no localizar faltas muy cercanas al transformador de medición, ya que ocurre una superposición de las componentes de las distintas ondas viajeras reflejadas y transmitidas.

Al ser la localización de falta una tecnología puntera para integrar dentro de los relés de protección diferencial de línea, el precio de estos es elevado si se compara con uno que no posee estas características. Sin embargo, el poder integrar la localización de faltas mediante onda viajera en el propio relé de protección supone un ahorro frente a otras soluciones que requieren de la instalación de un equipo adicional.

La naturaleza de las ondas viajeras hace que no sea posible la detección de las mismas a través del algoritmo de las componentes simétricas debido a que las componentes simétricas no son capaces de medir el tiempo en el que la onda viajera llega a cualquiera de los dos extremos de la línea. Sin embargo, existen otra serie de algoritmos que si son capaces de medir el tiempo de llegada de la onda viajera, como la transformada Wavelet, la transformada de Clarke o la transformada de Park. Aunque estas últimas son más complejas y requieren de un cálculo operacional mayor.

Por tanto, es de esperar que, la mayor precisión, la eliminación de factores de error, el bajo coste y fácil utilización de los relés que integran la localización de falta por onda viajera contribuirán sustancialmente a la seguridad, confiabilidad y mantenimiento de las líneas aéreas de transmisión.

CAPÍTULO 7

SIMULACIONES

En este capítulo se realizarán las simulaciones necesarias para verificar el correcto comportamiento de los relés de distancia por onda viajera. Además, se simulará en idénticas situaciones un relé de distancia basado en los métodos tradicionales para comparar el error entre ambos.

El sistema sobre el cual se realizarán las simulaciones va a ser una línea aérea con una tensión nominal de 400 kV y una longitud total de 80 kilómetros. Esta línea es una línea real que se encuentra localizada en España en la que Red Eléctrica Española realiza estudios de todo tipo. En los siguientes apartados se explicará el modelo elegido para la línea, los diferentes dispositivos que componen el sistema a simular, los escenarios de cada una de las simulaciones y el cálculo de la velocidad de propagación de la línea. También se expondrán los softwares que han sido utilizados para dichas simulaciones.

7.1 Programas utilizados en la simulación.

Los programas que se han utilizado para poder comprobar los comportamientos de los relés de protección de distancia por onda viajera y de protección de distancia mediante los métodos tradicionales han sido ATP, Matlab y Wavewin.

El ATP es considerado el programa universal para el análisis de fenómenos transitorios electromagnéticos y de naturaleza electromecánica en sistemas eléctricos de potencia. Los estudios en los cuales se utiliza el ATP tienen múltiples objetivos: dimensionamiento de los equipos, solución de problemas de operación como cortocircuitos en el sistema eléctrico y análisis de los transitorios que ocurren en el sistema. El ATP cuenta con una gran cantidad de módulos para modelar un sistema de potencia. En nuestro caso el ATP va a ser utilizado para tomar datos tanto de tensión como de corriente en el sistema a simular.

Matlab es una herramienta de cálculo matemático, optimizada para resolver problemas del ámbito ingenieril y científico. Su lenguaje está basado en matrices y mediante gráficos facilita la visualización de datos. Cuenta con una amplia librería de toolboxes que permiten trabajar con algoritmos esenciales en cada ámbito. En nuestro caso va a ser utilizado para el procesamiento de señales, calculando el tiempo de llegada de la onda viajera al relé gracias a la toolbox sobre wavelet.

Wavewin es un analizador de faltas eléctricas, es capaz de analizar de forma rápida los registros de actividad de las protecciones digitales. Además de la visualización es capaz de calcular valores como impedancias de salida, componentes simétricas, tensiones y corrientes eficaces. En nuestro caso será utilizado para analizar las señales de tensión y corriente cuando se produce

un cortocircuito, calculando de forma rápida la localización de la falta a través del método de la reactancia.

7.2 Sistema a simular

A continuación, se procederá a explicar el sistema base sobre el cual se realizarán las simulaciones. El elemento principal va a ser una línea de 400 kV con una longitud de 80 kilómetros, realizando transposiciones de las fases cada 20 kilómetros. Además, con el objetivo de acercarnos a un caso práctico real, en cada uno de los extremos de la línea habrá una subestación, formada por los dispositivos de toma de medidas y un interruptor de corte. De cada una de las subestaciones también salen dos líneas con una longitud mayor que la principal, 120 kilómetros, el objeto de la colocación de estas líneas reside en el cambio de impedancia que se produce, al estar ambas líneas colocadas en paralelo. Esta variación de la impedancia característica es observada por la onda viajera que se desplaza hacia el extremo, haciendo sufrir cambios en los parámetros de reflexión y refracción. El último componente necesario es una fuente de tensión para asignar la tensión nominal al sistema, se ha situado antes de las dos líneas largas para evitar que la tensión que llegue a línea principal sea la tensión ideal, asemejándose así más a un caso real. En la ilustración 35, podemos observar la representación del sistema realizada en la ventana ATPDraw:

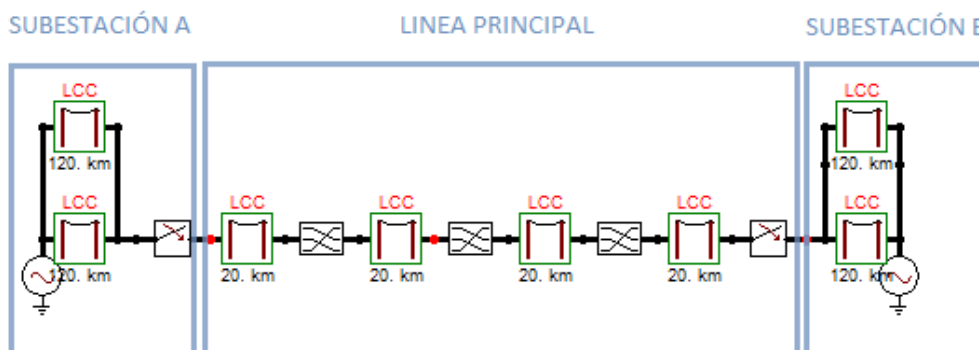


Ilustración 35: Diagrama del sistema a estudiar

En esta ilustración no aparece los dispositivos para la toma de muestras, ya que estos dependerán del tipo de método que se vaya a utilizar para la estimación de la localización de la falta. Más adelante en el apartado 7.5 se describirán los dispositivos necesarios para cada uno de los diferentes métodos a simular.

La línea cuenta con tres cables por fase con un tipo de conductor CARDINAL y dos cables de guarda de tipo OPGW 52F.O.El dimensionamiento detallado de los conductores y el tipo de los mismos está descrito en el anexo II.

En el ATPDraw podemos encontrar todos los componentes necesarios para reproducir cualquier tipo de circuito eléctrico, pudiendo modificar sus parámetros para ajustarse al caso que se quiera reproducir. Ofrece elementos de todo tipo desde fuentes de tensión y corriente, hasta transformadores trifásicos pasando por todo tipo de interruptores y líneas.

Ahora vamos a proceder a explicar cada uno de los módulos o bloques que forman el sistema en detalle.

Se va a comenzar explicando el módulo que representa la línea. En ATPDraw existen diferentes tipos de línea con la que simular circuitos, tales como las de parámetros distribuidos o las de parámetros concentrados. En nuestro caso, vamos a utilizar una línea de parámetros distribuidos, debido a que la línea eléctrica tiene una gran longitud. El símbolo de este tipo de línea representado en ATPDraw es el siguiente:



Ilustración 36: Representación de la línea de parámetros distribuidos en ATPDraw

Una vez se ha seleccionado el formato de parámetros distribuidos, necesitamos elegir el tipo de modelo de esta. El ATPDraw nos deja seleccionar un tipo de modelo de línea entre Bergeron, PI, JMartik, Semlyen y Noda. Para realizar nuestro estudio vamos a seleccionar el tipo de modelo Jmarti, ya que es adecuado para líneas dependientes de la frecuencia, este modelo aproxima la admitancia característica y la constante de propagación por funciones racionales, lo que conlleva a ser adecuado para líneas largas y a elevadas frecuencias.

Las características eléctricas de una línea de transmisión dependen principalmente de la construcción de la línea. Los valores de inductancia y capacitancia dependen de varios factores físicos, como el tipo de línea, la geometría de la torre, la longitud. En el anexo II, se muestra cual es la disposición geométrica de los apoyos de la torre, indicando las distancias y los radios de los conductores.

Los parámetros configurables dentro del bloque de línea, a parte del tipo de módulo son, la resistividad del terreno, la longitud de la línea y si se trata de una línea aérea o un cable subterráneo. Para nuestro caso vamos a tratar con una línea aérea con un valor de resistividad del terreno de 100Ω por metro y una longitud de 20 o 120 kilómetros.

Además, se tendrá en cuenta a la hora de realizar el cálculo el efecto pelicular, por el cual la corriente tiende a acumularse en la parte externa del conductor debido a la autoinducción, y se utilizará una matriz de transformación real, de manera que los vectores propios de la matriz de transformación giran más cerca del eje real, de modo que su parte imaginaria se supone insignificante. Ambas configuraciones son recomendadas para simulaciones de transitorios.

Al tener la línea una longitud elevada, para eliminar los efectos de las reactancias se realizan transposiciones, invirtiendo la posición de las fases entre sí cada cierta distancia. Para nuestro caso se realizan transposiciones cada 20 kilómetros. En ATPDraw existe la posibilidad de realizar

estas transposiciones de diferentes modos. Se ha seleccionado la transposición de fases que sigue el patrón ABC- CAB, este patrón está representado en la ilustración 37.

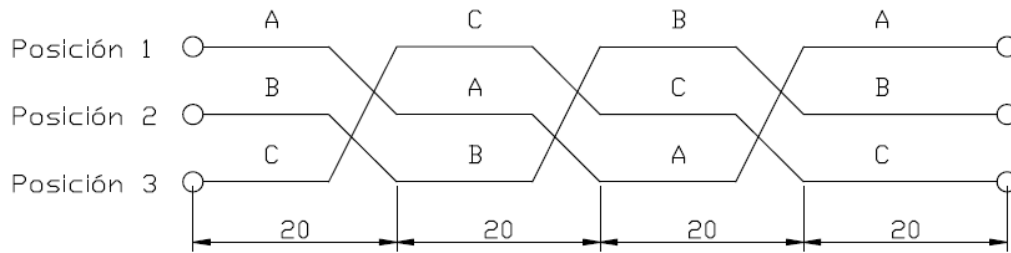


Ilustración 37: Disposición de las fases a lo largo de la línea

El icono utilizado en el diagrama de ATPDraw para las transposiciones con dicho patrón es el siguiente:



Ilustración 38: Representación de la transposición de fases en ATPDraw

Continuando con los módulos utilizados, ATPDraw dispone de diferentes tipos de fuentes con las que energizar los circuitos, tales como fuentes tipo impulso, tipo rampa, sinusoidales de corriente continua y alterna, etc.

Para este proyecto vamos a utilizar fuentes de tensión de corriente alterna de tipo senoidal. El símbolo de este tipo de fuentes está representado en el ATPDraw con el siguiente bloque:



Ilustración 39: Representación de la fuente de tensión senoidal en ATPDraw

Como se puede observar existen dos fuentes de tensión, una en cada extremo de las líneas que salen de ambas subestaciones, buscando el objetivo de que la tensión que llega a la línea de estudio no sea ideal. La tensión nominal del sistema, 400 kV es la proporcionada por dichas fuentes. En nuestro caso, la tensión que se introduce en estas fuentes corresponde con la tensión fase tierra que tiene un valor de 230 kV. Otro de los parámetros configurables en este modulo es la frecuencia, en este caso se ha seleccionado una frecuencia de 50 Hz. Además, cabe destacar que entre ambas fuentes existe una diferencia en el ángulo de la tensión, de modo que exista un intercambio de potencia activa.

A continuación, vamos a analizar el interruptor. ATPDraw cuenta con una amplia gama de interruptores entre los que se encuentran los interruptores controlados por tiempo, los controlados por tensión o los interruptores de medida.

En el sistema a simular se van a utilizar dos interruptores trifásicos controlados por tiempo, representados mediante el icono de la ilustración 40.



Ilustración 40: Representación del interruptor trifásico controlado por tiempo en ATPDraw

Las configuraciones de este tipo de interruptores están relacionadas con el tiempo de cierre y tiempo de apertura de cada fase del interruptor, aunque también existe la posibilidad de apertura del interruptor cuando la corriente supere un valor fijado. Para nuestro caso, ambos interruptores partirán cerrados, ya que nos vamos a encontrar en una condición de operación estable. Una vez se produzca la falta los interruptores se abrirán tras 70 ms tras la aplicación de la falta, siendo 20 ms para la detección de la falta por parte de la protección de distancia y 50 ms para la apertura del propio interruptor.

Por último y aunque no aparezcan representados en el sistema vamos a analizar tanto el voltímetro como el amperímetro. Su objetivo es la toma de datos de tensión y corriente. Para nosotros van a representar los transformadores capacitivos de tensión y los transformadores de corriente, mediante los cuales se obtienen las muestras de tensión y corriente en una línea de alta tensión como la nuestra. Ambos módulos te permiten tomar los datos de cada una de las fases del sistema. El voltímetro y el amperímetro están representados en el ATPDraw mediante los siguientes iconos:



Ilustración 41: Representación del amperímetro en ATPDraw



Ilustración 42: Representación del voltímetro en ATPDraw

7.3 Impedancia y velocidad de propagación de la línea.

Existen múltiples métodos para estimar los parámetros de una línea a partir de la disposición de sus conductores, como pueden ser las series de Carsson.

Se cuenta con la ventaja que la línea es real y que REE conoce sus parámetros a partir de herramientas internas. A continuación, se indicarán los principales parámetros de la línea, tanto en secuencia directa como en secuencia homopolar:

r_1	0.02614905 Ω/km
x_1	0.2944487 Ω/km
b_1	$3.994693 \cdot 10^{-9} \text{ s/km}$
r_0	0.2042874 Ω/km
x_0	0.6949729 Ω/km
b_0	$3.072563 \cdot 10^{-6} \text{ s/km}$

Tabla 3: Parámetros de la línea

Como se puede observar los parámetros están divididos entre km, de manera que multiplicando los parámetros por la longitud total de la línea podemos obtener la impedancia de línea y la impedancia homopolar. Esta última, contiene las impedancias de los cables de guarda, la de retorno por tierra y la de los propios conductores.

Realizando la multiplicación por 80 km, se obtiene que la impedancia de la línea será:

$$Z_L = 2.09192 + j 23.5559 \Omega$$

Del mismo modo, la impedancia homopolar tendrá el valor de:

$$Z_{Lo} = 16.34299 + j 55.59783 \Omega$$

Ambas impedancias serán utilizadas para el cálculo de la intensidad a partir del método de la reactancia.

A continuación se va a proceder a calcular la velocidad de propagación de la línea, parámetro necesario para la estimación de la localización de la falta mediante ondas viajeras. El cálculo de la velocidad se realiza a través de la siguiente expresión:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L * C}} \quad (74)$$

Los parámetros de la inductancia y capacitancia pueden ser calculados ya que se conoce el valor de la reactancia (x) y la susceptancia (b). Aplicando las siguientes ecuaciones y despejando podemos obtener dichos valores.

$$x = w * L \quad (75)$$

$$b = w * C \quad (76)$$

$$L = \frac{x}{w} = \frac{0.2944487}{2 * \pi * 50} = 9.373 * 10^{-4} \left[\frac{H}{km} \right] \quad (77)$$

$$C = \frac{b}{w} = \frac{3.994693 * 10^{-9}}{2 * \pi * 50} = 1.272 * 10^{-8} \left[\frac{F}{km} \right] \quad (78)$$

Una vez obtenidos ambos parámetros solo es necesario introducirlos en la ecuación 74:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L * C}} = \frac{1}{\sqrt{9.373 * 10^{-4} * 1.272 * 10^{-8}}} = 289689 \left[\frac{km}{s} \right] \quad (79)$$

7.4 Realización de cortocircuitos

El objetivo del proyecto es comprobar el correcto funcionamiento de la protección de distancia por onda viajera comparándola con la protección de distancia tradicional. Para verificar el comportamiento de la protección es necesario realizar cortocircuitos. En este apartado se va a explicar el procedimiento a seguir para realizarlos.

En este Trabajo de Fin de Grado se van a realizar cortocircuitos monofásicos a tierra. La forma más eficaz de realizarlos en ATP es mediante un interruptor y una resistencia puesta a tierra. Se puede observar este método en la ilustración 43.



Ilustración 43: Representación de un cortocircuito monofásico a tierra en ATPDraw

El nodo F, representa el lugar en el cuál se va a realizar el cortocircuito. Aguas debajo de este nodo se puede observar un SPLITTER, un interruptor y la resistencia conectada a tierra. Se podrá cambiar el valor de la resistencia de falta a través del módulo del ATPDraw.

En este caso se va a utilizar un interruptor distinto al utilizado en el sistema a simular, el interruptor elegido es un interruptor monofásico controlado por tiempo, de modo que empezará abierto y en el instante en el que se quiera producir la falta se cerrará.

A lo largo de todas las simulaciones siempre vamos a realizar el cortocircuito en el mismo instante de tiempo, para que no existan variaciones en el valor de la tensión en ese instante. El cortocircuito se va a producir en el instante de tiempo 20 ms. Permaneciendo activo hasta el momento en el que disparen los interruptores de las subestaciones.

Por último, cabe destacar la caja separadora o SPLITTER, su función es separar de la línea cada una de sus fases, de la siguiente manera:

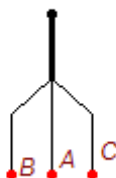


Ilustración 44: Representación de la caja separadora en ATPDraw

De manera que la rama de la izquierda corresponderá a la fase B, la central a la fase A y la de la derecha a la fase C. Para nuestras simulaciones siempre se realizará el cortocircuito en la fase A de la línea.

A modo recordatorio, todos los cortocircuitos realizados en las simulaciones serán faltas monofásicas entre la fase A y tierra y se producirán en el instante de tiempo 20 ms. Los parámetros variables serán el valor de la resistencia de falta y el punto donde se realice el cortocircuito.

7.5 Actuación de cada uno de los métodos

7.5.1 Método de ondas viajeras basado en las corrientes de un único extremo.

Para este método se utilizan las muestras de corriente tomadas en un único extremo de la línea. Con este apartado se quiere representar la simulación real del caso teórico del apartado 3.3. Para la resolución del problema propuesto será necesario la utilización de dos programas, primero mediante ATP se obtendrán los datos de la corriente de un extremo, después mediante un código de Matlab calculará el tiempo de llegada de la onda viajera al extremo de la línea.

Como se ha indicado anteriormente, el sistema a simular va a ser el mismo que el de la ilustración 35, pero añadiendo los dispositivos de medición necesarios para esta técnica. Como se ha mencionado en apartados anteriores este método obtiene la localización de la falta a partir de las medidas de corriente de uno de los extremos de la línea. Por este motivo, colocaremos un amperímetro a efectos de un transformador de corriente en uno de los extremos de la línea

a estudiar. En la ilustración 45 en la cual se muestra el diagrama del sistema, se puede observar la colocación del amperímetro en el punto A.

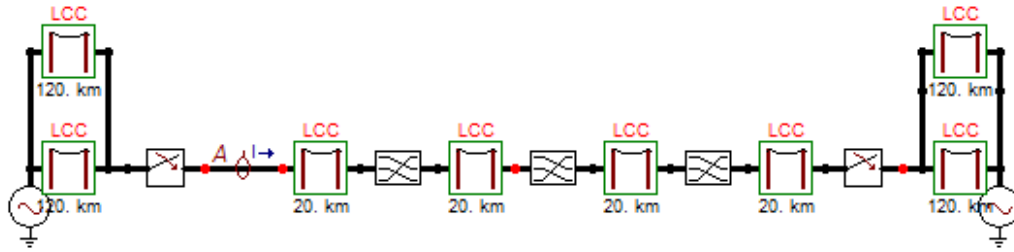


Ilustración 45: Sistema de localización de falta mediante onda viajera basado en un extremo de línea

El cálculo de la localización de la falta se realiza a través de la ecuación (24) vista en el apartado 3.3. Para este cálculo es necesario el tiempo que tarda en llegar la primera onda viajera al extremo y el tiempo que tarda la primera onda reflejada en llegar al extremo. Mediante el análisis a través de la transformada discreta de wavelet, podemos obtener los coeficientes de detalle y aproximación de la onda. De modo que multiplicando el número de muestra del coeficiente de detalle por el tiempo en el que se obtiene una muestra, se obtendrá el tiempo en segundos de la llegada de la onda viajera.

$$m = \left(\frac{t_{L2} - t_{L1}}{2} \right) v \quad (80)$$

La frecuencia de muestreo de este método va a ser la misma que tiene el relé de SEL , es decir de 1.5 MHz. Para conseguir esta frecuencia de muestreo de los datos recurrimos a los ajustes del ATP.

El ATP consta de dos parámetros claves a la hora de seleccionar la frecuencia de muestreo: ΔT y T_{max} . T_{max} representa el tiempo máximo en el que se va a realizar la simulación, mientras que ΔT representa el tiempo en el que se toma una muestra.

Conociendo la frecuencia de muestreo podemos obtener el parámetro de ΔT :

$$\Delta T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1.5 \times 10^6} = 6.667 \times 10^{-7} \text{ s/muestra} \quad (81)$$

El siguiente parámetro que vamos a seleccionar va a ser el tiempo de simulación, debido a que el fenómeno de onda viajera se produce en un intervalo de tiempo muy rápido. Analizaremos la

corriente hasta pasados 8 ms después de la realización de la falta, tiempo más que suficiente para analizar las reflexiones y refracciones de la onda viajera. De modo que el tiempo total de la simulación, T_{max} , será de 28 ms.

7.5.2 Método de ondas viajeras basado en las corrientes de ambos extremos.

Para este método se utilizan las muestras de corriente tomadas en ambos extremos de la línea. Con este apartado se quiere representar la simulación real del caso teórico del apartado 3.2. La resolución de este problema se realizará de manera muy parecida al método basado en un único extremo de línea, con la diferencia que en este caso se analizaran las corrientes de llegada a ambos extremos de la línea.

En este caso al ser necesario la toma de muestras de las corrientes en ambos extremos de la línea se añaden dos amperímetros, a modo de transformación de corriente, uno en el extremo de la línea A y otro en el extremo contrario B. Esto se puede observar en la ilustración 46:

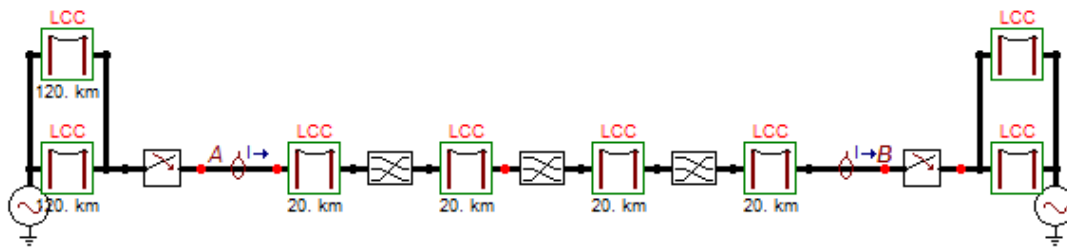


Ilustración 46: Sistema de localización de falta mediante onda viajera basado ambos extremos de línea

Como ya se ha visto anteriormente en este método la estimación de la falta se realiza a través de la expresión:

$$m = \frac{1}{2} [l + (t_L - t_R)v] \quad (82)$$

Para la cual m es la localización de la falta, v es la velocidad de propagación de la línea calculada en el apartado 7.3, t_L y t_R los tiempos de llegada de la onda viajera a cada uno de los extremos y l la longitud total de la línea.

Para obtener el tiempo de llegada de la onda viajera a cada uno de los extremos de la línea, realizaremos la transformada discreta de wavelet a las corrientes extraídas del ATP.

Para este caso se va a utilizar la misma frecuencia de muestreo que en el apartado anterior, es decir 1.5 MHz. Con esta frecuencia de muestreo trabajan los relés de protección de distancia

por la función de onda viajera de SEL. Realizando la misma operación que en el apartado anterior, (81) obtenemos la frecuencia de muestro introduciendo en ATP los valores de 28 ms para T_{max} y de 6.667×10^{-7} para ΔT .

7.5.3 Método tradicional.

Para comprobar el funcionamiento de la mayoría de los relés actuales se va a simular el método tradicional. En este método es necesario tomar medidas de tensión y corriente en uno de los extremos de la línea.

Para este caso se añadirán un voltímetro a modo de transformador de tensión capacitivo y un amperímetro como sustituto del transformador de corriente ambos situados en el extremo L, en el punto A. De esto modo podremos obtener las muestras de las tensiones y corrientes de fase en uno de los extremos. La ilustración 47 representa el diagrama del sistema a simular:

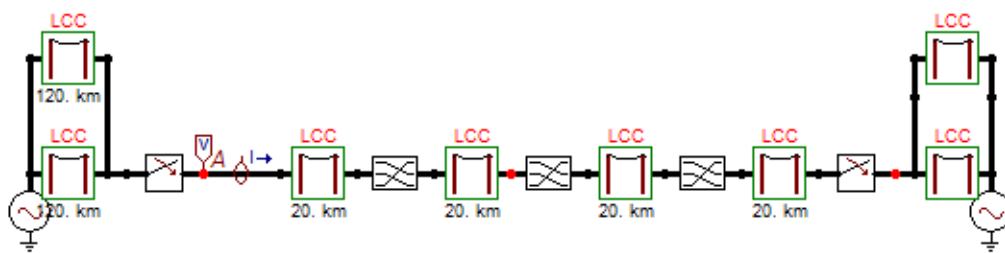


Ilustración 47: Sistema de localización de falta mediante el método tradicional

Se va a utilizar el mismo proceso que realiza un relé para estimar la localización de falta por este método. Para ello se aplicará la transformada de Fourier al primer ciclo de onda, calculando la impedancia que ve el relé, después se correrá una ventana 20 ms y se volverá a analizar mediante un ciclo de Fourier y así sucesivamente. Por ese motivo es necesario poder observar varios ciclos de onda completos. Debido a esto, al producirse la falta monofásica a tierra en el instante de tiempo 20ms, la simulación deberá de alcanzar al menos los 80 ms, pudiendo así obtener dos tres de onda en el estado de falta. Como bien se ha explicado anteriormente, los interruptores de corte tardarán en abrirse 70 ms, sumando este tipo al tiempo hasta que se produce la falta, obtenemos un tiempo total de simulación de 90ms. El relé es capaz de estimar el valor de la impedancia a través de la siguiente ecuación.

$$Z = \frac{V_A}{I_a + k_0 \times 3I_0} \quad (83)$$

Donde V_A es la tensión eficaz de la fase A e I_a la corriente eficaz de la fase A. Del mismo modo I_0 representa el valor de la corriente homopolar mientras que k_0 es:

$$k_0 = \frac{Z_{Lo} - Z_L}{3Z_L} \quad (84)$$

Donde Z_{Lo} representa la impedancia de la línea de puesta a tierra o cable de guardia y Z_L la impedancia de la línea.

Mediante el software Wavewin podemos obtener los valores eficaces de la tensión y corriente de cada ciclo. Del mismo modo, es capaz de calcular el valor eficaz de la corriente homopolar dentro de un ciclo. Además posé una herramienta de gran utilidad, una calculadora de faltas, donde se puede estimar la impedancia de la falta a través del método tradicional.

Para calcular la ubicación se deberá seguir el siguiente procedimiento. Se deben de cargar las señales de las tensiones y corriente en el programa. Se debe de crear otro canal el cual calcule la componente homopolar de la corriente. En la calculadora es necesario cargar cada uno de los términos de la ecuación (83), asignando un canal a cada termino. Además se deberá de introducir la impedancia de secuencia directa de la línea y la impedancia de secuencia homopolar, calculadas en el apartado 7.3. De este modo, calculara el termino k_0 necesario para la localización de la falta. Una vez asignados estos valores el software será capaz de calcular la impedancia de falta. Para calcular la localización de la falta se deberá aplicar la siguiente expresión:

$$m = \frac{X_{cal}}{X_L} * L \quad (85)$$

Donde m es la localización de la falta, X_{cal} es la reactancia de falta calculada por el Wavewin, X_L es la reactancia de la línea calculada en el apartado 7.3, y L es la longitud total de la línea.

Está técnica no utiliza las ondas viajeras para estimar la localización de la falta si no los valores de tensión y corriente en el momento de la falta, por ello tiene una frecuencia de muestreo de 1 kHz. Para que los datos obtenidos mediante el ATP tengan dicha frecuencia, se configuran los parámetros de ΔT y T_{max} .

A partir de la frecuencia de muestreo de 1 kHz se puede obtener el valor del parámetro ΔT a partir de la ecuación (81):

$$\Delta T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1 \times 10^3} = 1 \times 10^{-3} \text{ muestras por segundo} \quad (86)$$

Este valor tendrá que ser introducido para que la frecuencia de muestreo sea la correcta. Por otra parte, se ha definido el tiempo de simulación, T_{max} , en 90 ms, de los cuales 20 serán en estado de pre falta.

7.6 Escenarios a simular

En este apartado se llevarán a cabo las diferentes simulaciones del sistema, con el objetivo de comprobar la correcta localización de la falta mediante el sistema de localización de faltas por onda viajera frente al sistema de localización por el método tradicional en dos escenarios diferentes. En el primero de ellos se comprobará como afecta el cambio de la resistencia de puesta a tierra en la localización de la falta. En el segundo se comprobará el funcionamiento de los sistemas de protección de distancia tanto por onda viajera como mediante los métodos tradicionales en función de la distancia en la que se produce la falta.

7.6.1 Variación de la resistencia de falta

Se va a proceder a simular el sistema de la ilustración 35 por cada uno de los métodos citados anteriormente. Se simularán un total de 3 casos, cada uno de estos casos se realizará por los tres métodos diferentes; localización de falta por onda viajera basándose en las corrientes de un único extremo, localización de falta por onda viajera basándose en las corrientes de ambos extremos y localización de falta basándose en el método tradicional, en total 9 simulaciones. En estas simulaciones va a ir aumentando de manera progresiva el valor de la resistencia de puesta a tierra de la falta monofásica, empezando en un valor muy bajo de $1 \times 10^{-7} \Omega$ y terminando con un valor de resistencia de falta muy elevado de 150Ω . El valor intermedio de la resistencia de falta será de 12Ω .

Para todos estos casos se realizará una falta monofásica en la fase A en la mitad de la línea, es decir en el kilómetro 40.

7.6.1.1 Caso 1

Los datos de partida se podrán ver reflejados en la siguiente tabla:

Resistencia de falta	$1 \cdot 10^{-7} \Omega$
Localización donde se produce la falta	40 km

Tabla 4: Parámetros de entrada del caso 1

Primero analizaremos la estimación de la localización de la falta mediante onda viajera basada en un único extremo. Para ello, extraeremos los datos de la corriente del ATP a una frecuencia de 1.5 MHz. Después ejecutaremos el código de Matlab para extraer los coeficientes de detalle de la señal mediante la transformada discreta de wavelet. Podemos observar el resultado de la ejecución del código en la siguiente ilustración, donde se muestra la señal original y los cuatro primeros coeficientes de detalle:

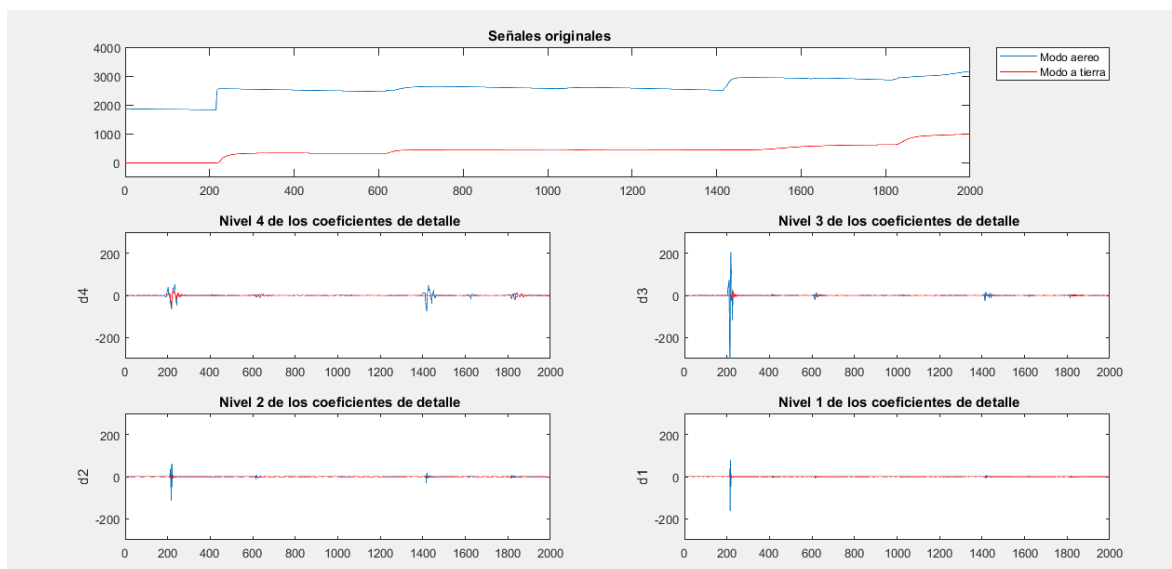


Ilustración 48: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo I

Como se puede observar en el tercer nivel de detalle es donde mejor podemos apreciar los tiempos de llegada de la onda viajera al extremo:

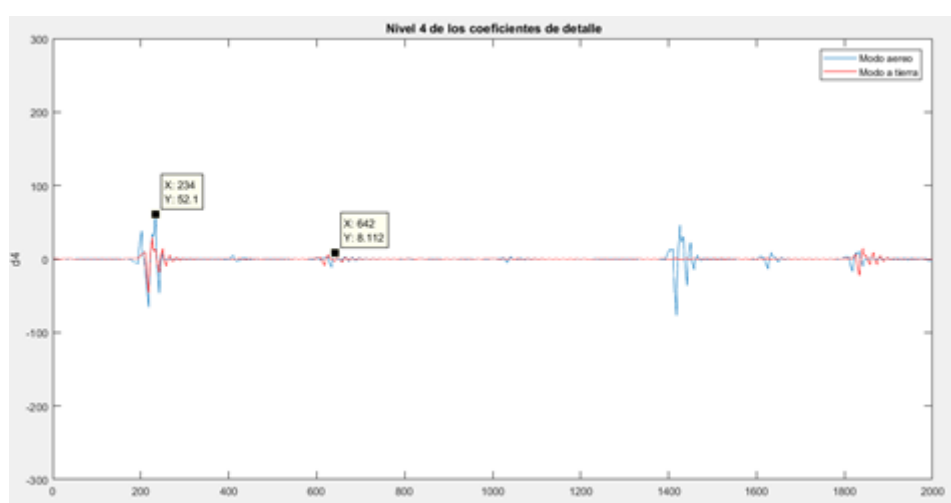


Ilustración 49: Coeficientes del cuarto nivel de detalle

En esta ilustración podemos observar los tiempos de llegada de la primera onda viajera y de la primera onda viajera reflejada. Con estos valores podemos realizar el cálculo de la localización de la onda viajera mediante expresión (80):

$$m = \frac{(642-234)*6.667*10^{-7}}{2} * 289689 = 39.4 \text{ km} \quad (87)$$

Una vez se tiene la estimación de la falta, se calculará el error que se ha cometido. Para este caso se ha cometido un error de 600 metros lo que en tanto por ciento supone:

$$error = \frac{Localización_{real} - Localización_{estimada}}{Localización_{real}} * 100 = 1.5\% \quad (88)$$

A continuación se calculará la distancia de falta mediante onda viajera a través de las corrientes de ambos extremos de la línea, l y r.

Para ello, extraeremos las muestras de las corrientes del ATP y aplicando la transformada discreta de wavelet mediante el código de Matlab del anexo III a cada una de las corrientes obtendremos los tiempos de llegada de la onda viajera al extremo *L* y al extremo *R*.

A continuación se muestra el análisis de la corriente del primer extremo, *L*:

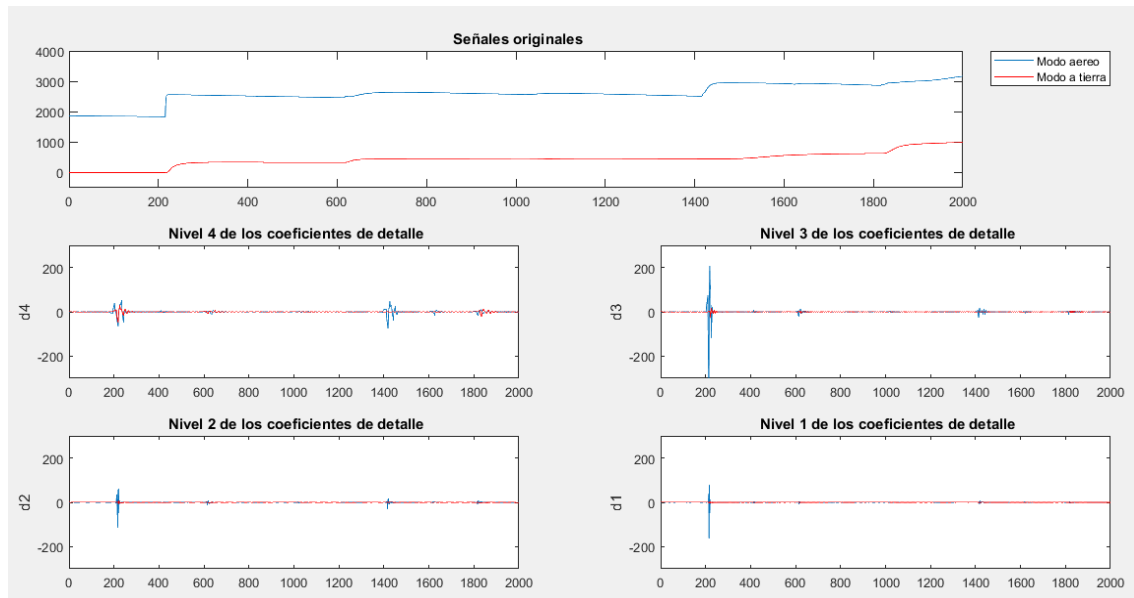


Ilustración 50: Coeficientes de la corriente del extremo l

Utilizando el coeficiente de detalle 3 podemos hallar la muestra en la que la onda viajera llega al extremo. Para calcular el tiempo solo será necesario multiplicar esa muestra por el tiempo de muestreo.

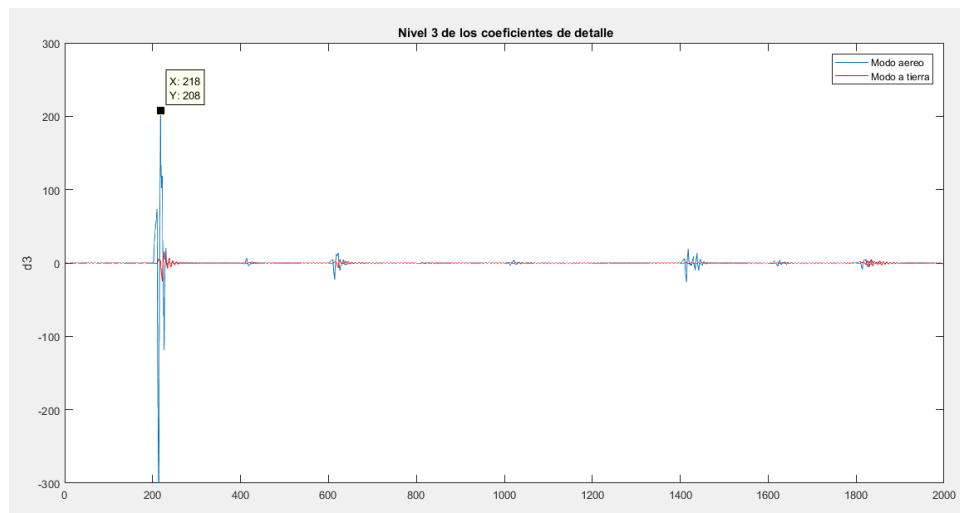


Ilustración 51: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo I

Del mismo modo, podemos obtener el tiempo de llegada de la onda viajera al extremo contrario, R .

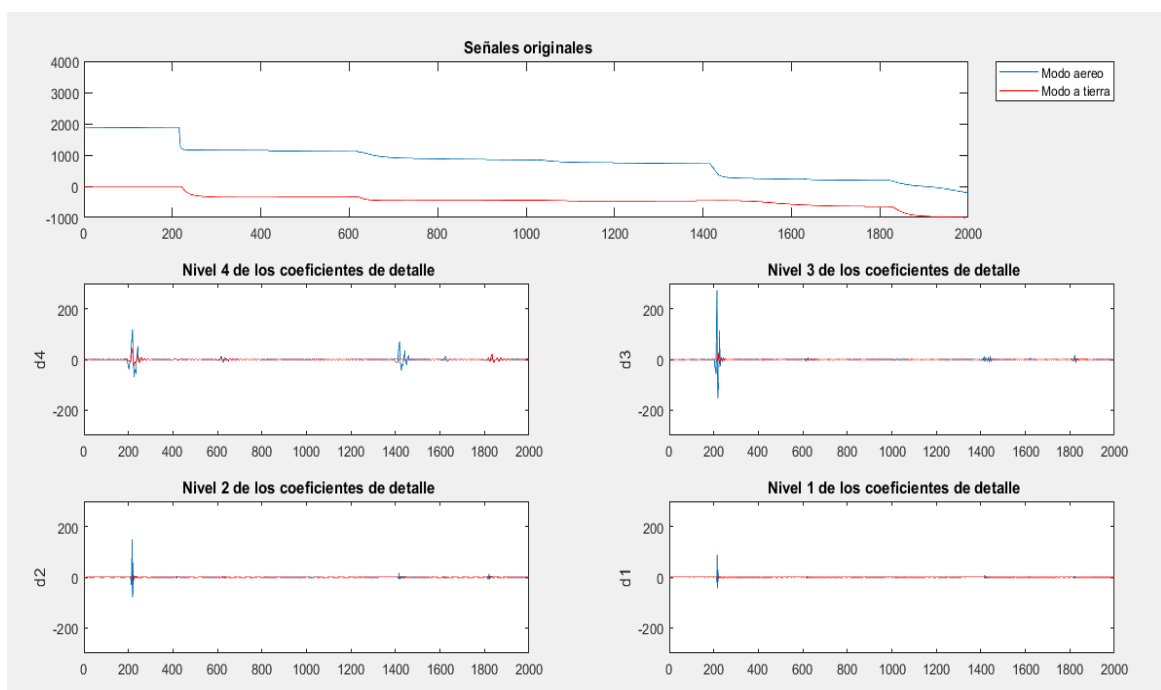


Ilustración 52: Coeficientes de la corriente del extremo r

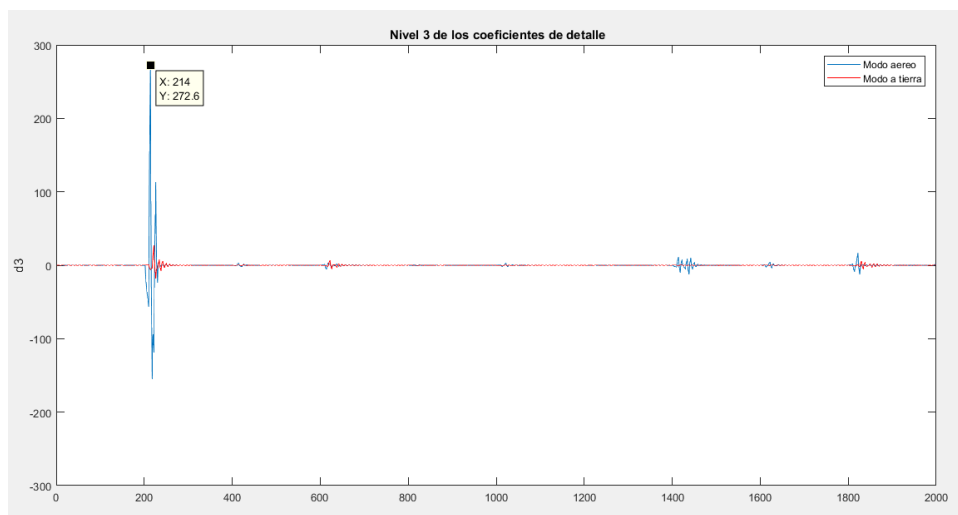


Ilustración 53: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo r

Una vez han sido obtenidos estos tiempos solo es necesario introducirlos en la ecuación (82) para obtener la localización de la falta:

$$m = \frac{1}{2} * [80 + (218 - 214) * 6.667 * 10^{-7} * 289689] = 40.39 \text{ km} \quad (89)$$

Teniendo un error de 390 metros, lo que supone un 0.97% de la longitud total de la línea.

Por último, estimaremos la localización a través del método de la impedancia. Para ello cargamos las señales de tensión y corriente en el Wavewin, obteniendo la siguiente ilustración:

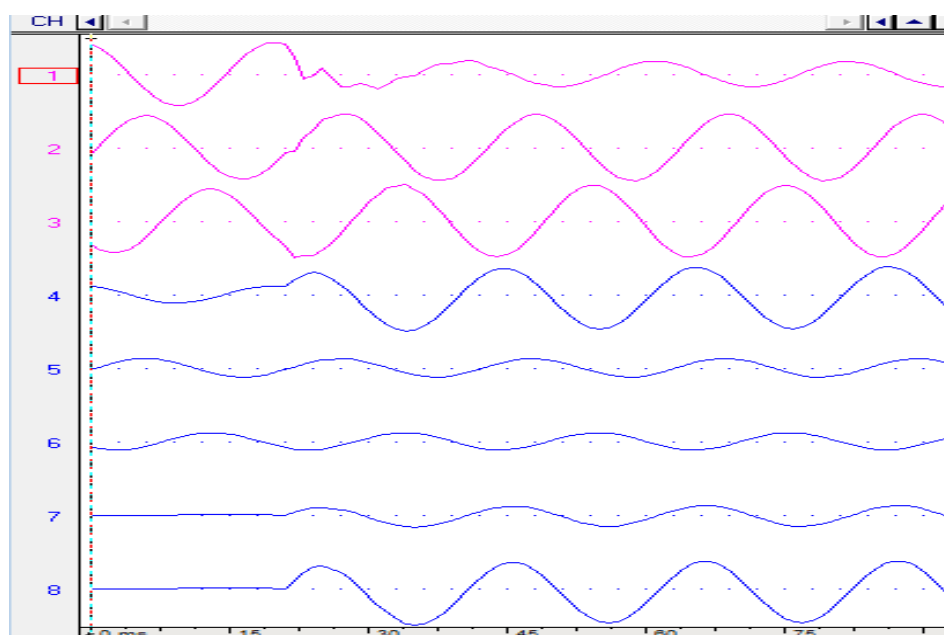


Ilustración 54: Oscilograma de tensiones y corrientes

Donde se encuentran las tensiones de la fase A, B y C, en los canales 1, 2 y 3. Del mismo modo en los canales 4, 5 y 6 se encuentran las corrientes de cada una de las fases, mientras que en el canal 7 podemos observar la corriente homopolar. Por último, en el canal 8 tenemos tres veces la corriente homopolar, la cual vamos a utilizar para la estimación de la falta.

A continuación mediante la herramienta de la calculadora de faltas podemos estimar la impedancia de la falta. Para ello introducimos los valores de impedancia de la línea e impedancia homopolar calculados en el apartado 7.3. Después introducimos los canales en los que se encuentra la tensión de fase y corriente de fase en los que se produce la falta. Por último, indicamos el canal en el que se encuentra el valor de tres veces la corriente homopolar.

Single Ended Fault Location Calculator

Radial Line Method | Reactance Method

Inputs:

V Channel Number: 1 | Z1 = 23,559 (Magnitude) | 84,9257 (Angle) | (Positive Sequence Line Impedance)

I Channel Number: 4 | Z0 = 57,9492 (Magnitude) | 73,6221 (Angle) | (Zero Sequence Line Impedance)

N Channel Number: 8

Notes:

The Fault Calculator uses a single ended algorithm based on a simple reactance method. The algorithm minimizes errors due to load flow and imbalances in pre-fault records.

Please select the faulted Voltage, Current and Neutral numbers from the drop down lists. Then enter the Positive and Negative Sequence line Impedances.

Press "Calculate" to run the Algorithm or "Refresh" to read the Voltage, Current and Neutral Values at the data bar.

Calculated Values:

Vf = 83726,224 (RMS) | 147,301 (Angle) | (Voltage Phasor @ Data Bar)

If = 5367,067 (RMS) | 72,691 (Angle) | (Current Phasor @ Data Bar)

IN = 5080,307 (RMS) | 56,540 (Angle) | (Neutral Phasor @ Data Bar)

K0 = 0,497 | -18,85 | ([Z0 - Z1] / [3 * Z1])

Zf = 11,051 (RMS) | 85,64 (Angle) | (Fault Impedance - [Vf / [If + [k0 * IN]]])

Result:

Fault Impedance: 11,051 Ohms [Vf / [If + [k0 * IN]]]

Plot | Report | Refresh | Calculate | Close

Ilustración 55: Calculadora de la impedancia de falta

La impedancia de falta calculada es de $11.051 \angle 85.64 \Omega$. Aplicando la ecuación (85) para obtener la estimación de la localización de la falta obtenemos:

$$m = \frac{11.019}{23.4667} * 80 = 37.56 \text{ km} \quad (90)$$

Suponiendo esto un error del 6.1%

Para concluir en la siguiente tabla se expondrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viejera con las corrientes de un extremo	39.40	600	1.5
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	40.39	390	0.97
Método tradicional	37.56	2440	6.1

Tabla 5: Resultados obtenidos del caso 1

7.6.1.2 Caso 2

Para esta simulación se partirá de los siguientes datos de resistencia y localización:

Resistencia de falta	12 Ω
Localización donde se produce la falta	40 km

Tabla 6: Parámetros de entrada del caso 2

Del mismo modo que en la simulación anterior, se va a comenzar estimando la localización de la falta a partir del método de onda viajera de un extremo. Para ello, se realiza la transformada discreta de wavelet a la corriente obtenida mediante ATP. En la siguiente ilustración podemos observar los coeficientes de detalle de nivel 4:

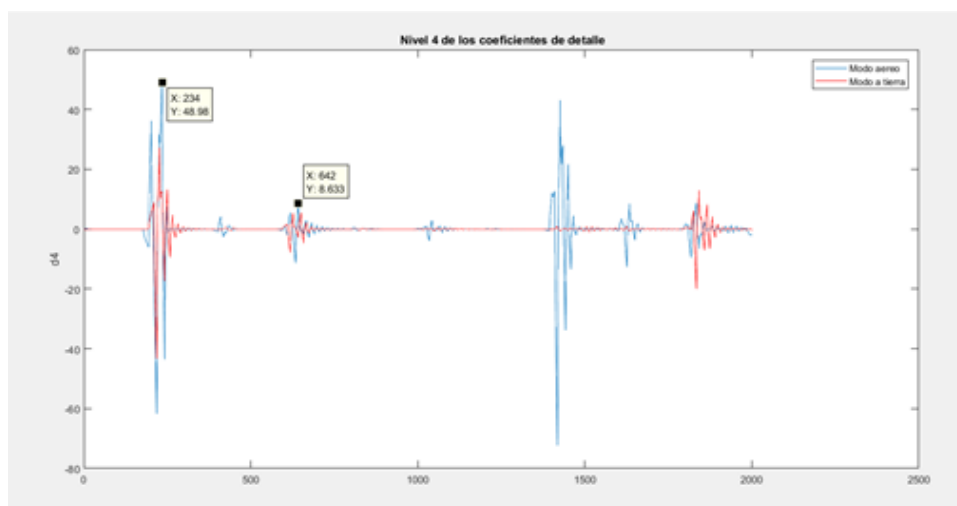


Ilustración 56: Coeficientes de detalle de cuarto nivel de la corriente

Una vez obtenidas las muestras en las que la primera onda viajera y la primera onda viajera reflejada llegan al extremo podemos obtener la localización de la falta:

$$m = \frac{(642-234) \cdot 6.667 \cdot 10^{-7}}{2} \cdot 289689 = 39.4 \text{ km} \quad (91)$$

La estimación de la locación de la falta tiene un error de 600 m, lo que supone un 1.5% de la longitud total de la línea.

Una vez estimada la localización de la falta basándose en la corriente de uno de los extremos, localizaremos la falta a través de la corriente de ambos extremos. Para este caso solo es necesario el tiempo de llegada de la primera onda viajera a cada uno de los extremos, por lo que con los coeficientes de detalle de nivel 3 de la transformada discreta de wavelet será suficiente. En las ilustraciones 57 y 58 podemos observar los dichos coeficientes de las corrientes del extremo *L* y del extremo *R*:

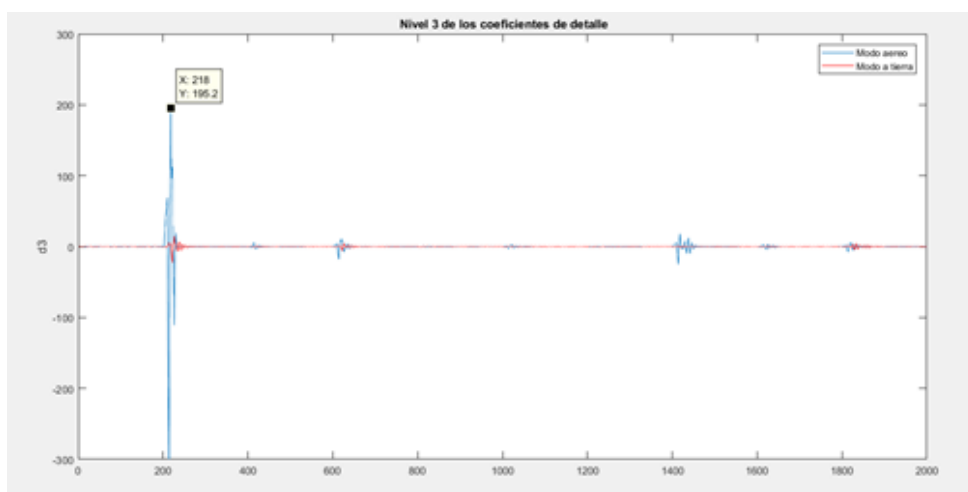


Ilustración 57: Nivel 3 de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo l

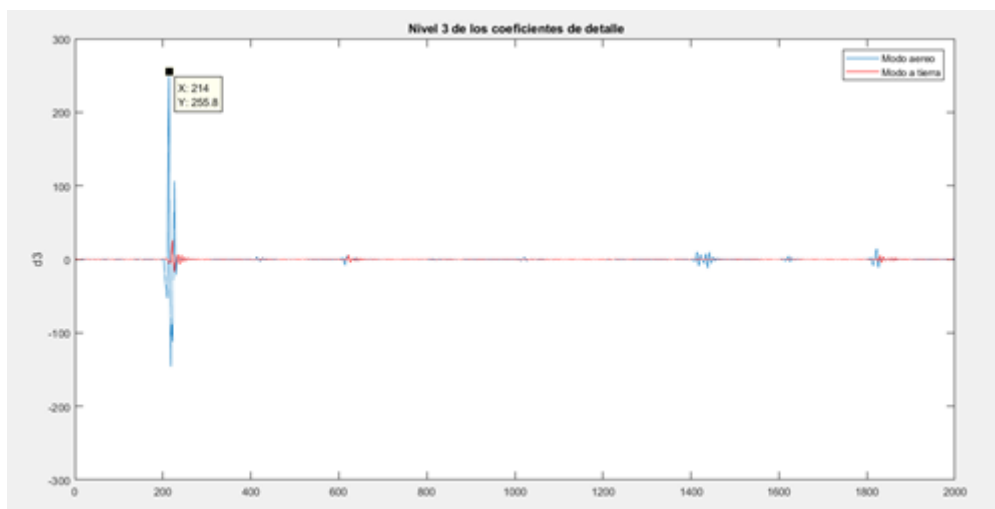


Ilustración 58: Nivel 3 de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo r

Analizando ambas graficas podemos estimar la localización de la falta como:

$$m = \frac{1}{2} * [80 + (218 - 214) * 6.667 * 10^{-7} * 289689] = 40.39 \text{ km} \quad (92)$$

Teniendo un error de 390 metros, lo que supone un 0.97% de la longitud total de la línea.

Por último, se procederá a evaluar el método tradicional. Para ello se cargarán en Wavewin los datos tanto de tensión como de corriente en uno de los dos extremos. Además, se procederá a calcular la corriente homopolar para poder calcular la localización de la falta.

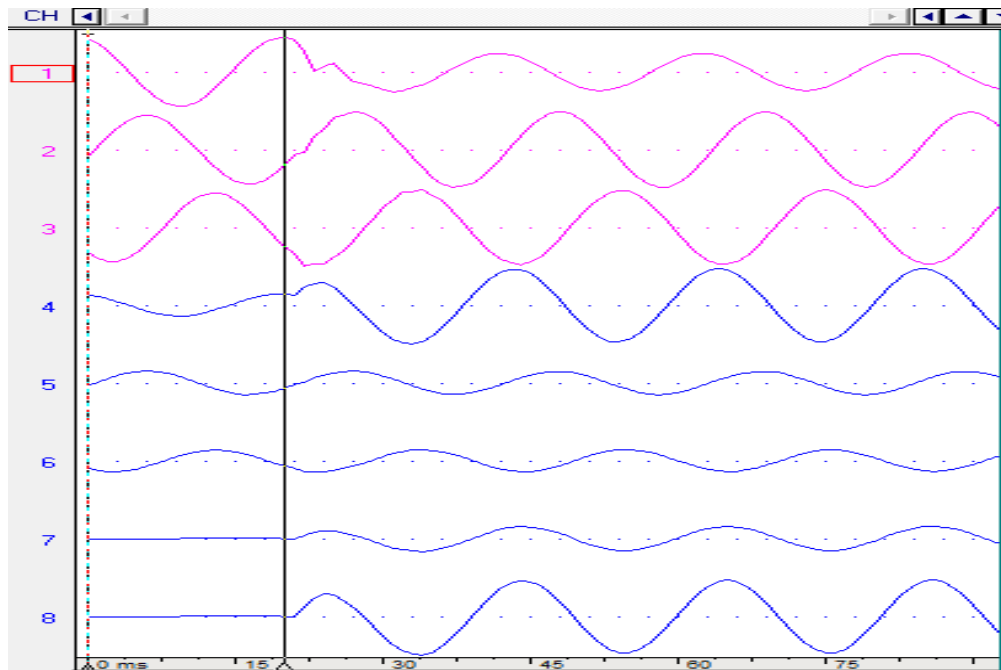


Ilustración 59: Señales de tensiones y corrientes

Utilizando la herramienta de cálculo de faltas, podemos obtener la impedancia de falta. Una vez tengamos este valor solo es preciso aplicar la ecuación (85):

Inputs

V Channel Number: Magnitude (Ohm) Angle (Deg)

I Channel Number: Z1 = (Positive Sequence Line Impedance)

N Channel Number: Z0 = (Zero Sequence Line Impedance)

Notes:

The Fault Calculator uses a single ended algorithm based on a simple reactance method. The algorithm minimizes errors due to load flow and imbalances in pre-fault records.

Please select the faulted Voltage, Current and Neutral numbers from the drop down lists. Then enter the Positive and Negative Sequence line Impedances.

Press "Calculate" to run the Algorithm or "Refresh" to read the Voltage, Current and Neutral Values at the data bar.

Calculated Values:

Vf = (Voltage Phasor @ Data Bar)

If = (Current Phasor @ Data Bar)

IN = (Neutral Phasor @ Data Bar)

K0 = ([Z0 - Z1] / [3 * Z1])

Zf = (Fault Impedance - [Vf / [If + [k0 * IN]]])

Result:

Ohms [Vf / [If + [k0 * IN]]]

Ilustración 60: Cálculo de la impedancia de falta

La impedancia de falta calculada es de $14.99 + j11.015 \Omega$, de modo que la estimación de la localización de la falta será:

$$m = \frac{11.015}{23.4667} * 80 = 37.55 \text{ km} \quad (93)$$

Para concluir en la siguiente tabla se expondrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viajera con las corrientes de un extremo	39.40	600	1.5
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	40.39	390	0.97
Método tradicional	37.55	2450	6.12

Tabla 7: Resultados obtenidos del caso 2

7.6.1.3 Caso 3

Esta simulación se realizará con los siguientes parámetros relacionados con la falta monofásica a tierra:

Resistencia de falta	150 Ω
Localización donde se produce la falta	40 km

Tabla 8: Parámetros iniciales del caso 1

Primero estimaremos la localización de la falta mediante la protección de distancia basada en onda viajera a través de la corriente de uno de sus extremos.

Se necesita conocer tanto el tiempo de llegada de la primera onda viajera como el tiempo de llegada de la primera onda reflejada. Para ello se aplicará la transformada discreta de wavelet a la corriente del extremo. En la ilustración 61 podemos observar los coeficientes de detalle del cuarto nivel. Conociendo los tiempos de llegada y la velocidad de propagación de la línea, se puede estimar la distancia a través de la ecuación (80).

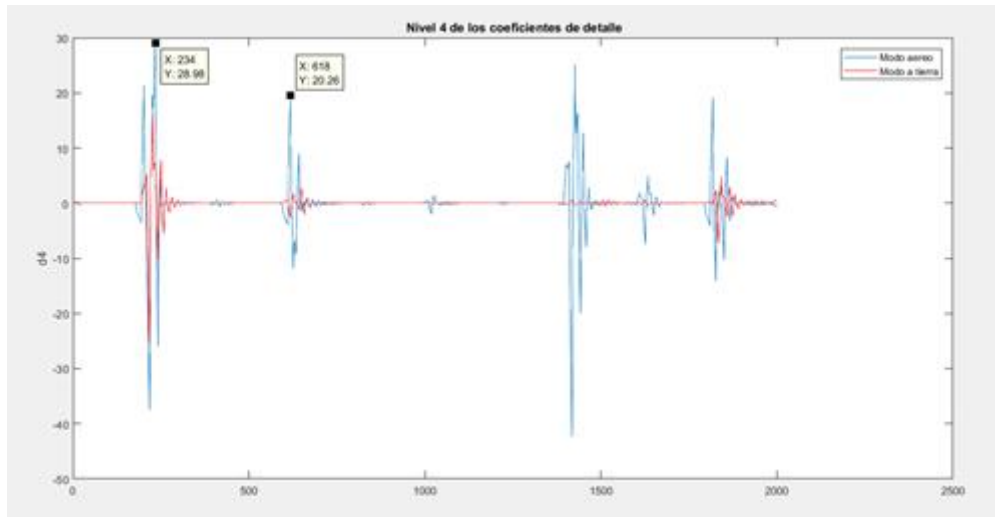


Ilustración 61: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente

Una vez obtenidas las ambas muestras podemos obtener la localización de la falta:

$$m = \frac{(642-234) \cdot 6.667 \cdot 10^{-7}}{2} * 289689 = 39.4 \text{ km} \quad (94)$$

La estimación de la locación de la falta tiene un error de 600 m, lo que supone un 1.5%

A continuación se realizará la estimación de la localización a través de la protección de distancia por onda viajera mediante las corrientes de ambos extremos. Mediante la transformada discreta de wavelet obtendremos el tiempo de llegada da la primera onda viajera a cada uno de los extremos.

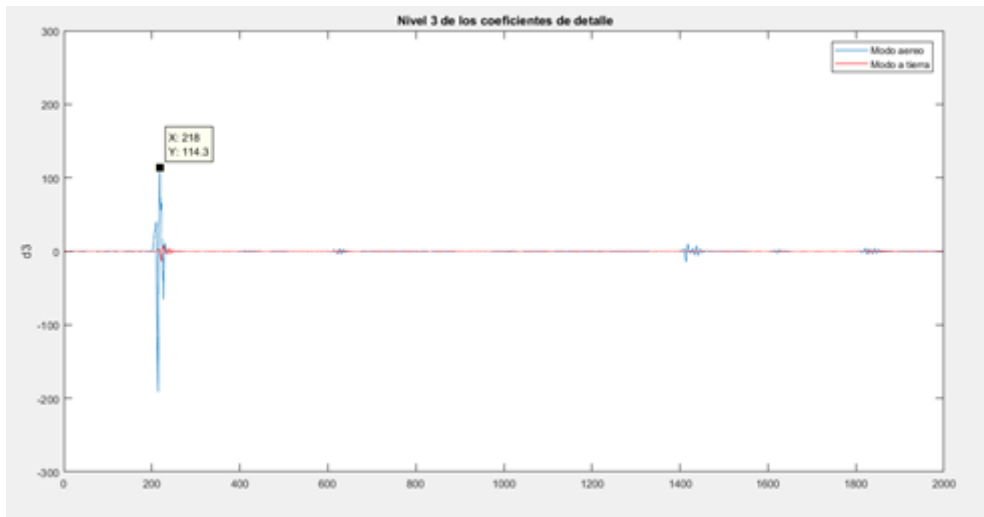


Ilustración 62: Tercer nivel de los coeficientes de la corriente del extremo l

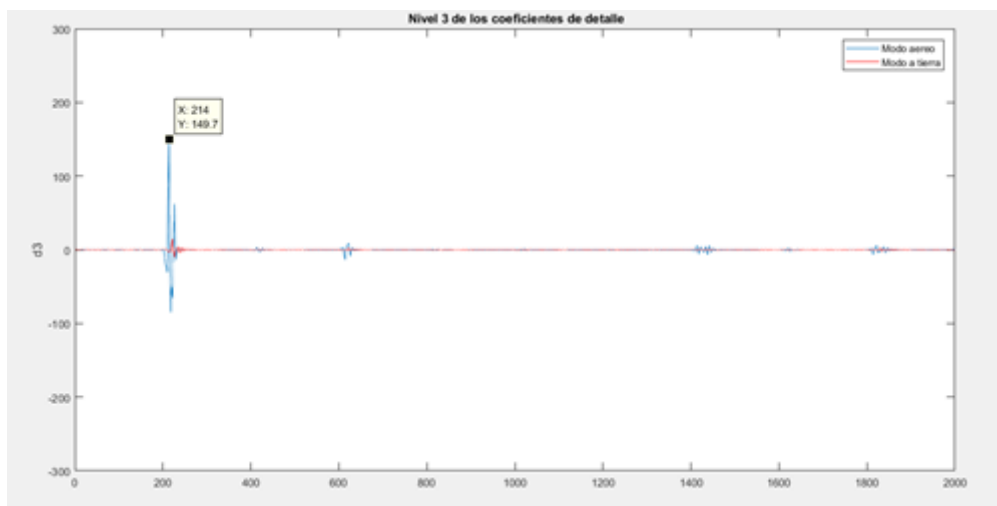


Ilustración 63: Tercer nivel de los coeficientes de la corriente del extremo r

Una vez obtenidos estos tiempos, y conociendo la longitud de la línea y su velocidad de propagación calcularemos la localización a través de la ecuación (82):

$$m = \frac{1}{2} * [80 + (218 - 214) * 6.667 * 10^{-7} * 289689] = 40.39 \text{ km} \quad (95)$$

Teniendo un error de 390 metros, lo que supone un 0.97%.

Por último se estimará la localización de la falta a través del método tradicional. Este método ya ha sido explicado en el apartado 7.5.3. Solo se necesitará cargar las tensiones y corrientes de fases obtenidas mediante el ATP. Los canales del 1 al 3 representan las tensiones de las fases, los canales del 4 al 6 representan las corrientes de las fases mientras que el canal 7 representa la corriente homopolar. Para estimar la localización solo es necesario ejecutar la herramienta de la calculadora de faltas obteniendo la impedancia de falta.

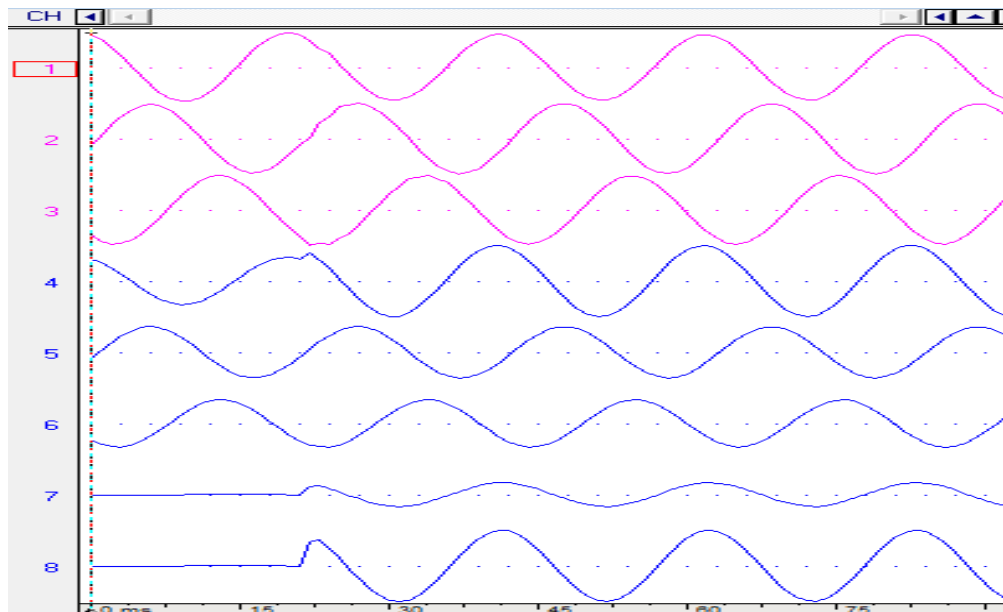


Ilustración 64: Muestras de las tensiones y corrientes en el extremo I

Inputs		Magnitude (Ohm)	Angle (Deg)	
V Channel Number:	1	Z1 = 23,559	84,9257	(Positive Sequence Line Impedance)
I Channel Number:	4	Z0 = 57,9492	73,6221	(Zero Sequence Line Impedance)
N Channel Number:	8			

Notes:

The Fault Calculator uses a single ended algorithm based on a simple reactance method. The algorithm minimizes errors due to load flow and imbalances in pre-fault records.

Please select the faulted Voltage, Current and Neutral numbers from the drop down lists. Then enter the Positive and Negative Sequence line Impedances.

Press "Calculate" to run the Algorithm or "Refresh" to read the Voltage, Current and Neutral Values at the data bar.

Calculated Values			
	RMS	Angle	
Vf =	214837,297	333,079	(Voltage Phasor @ Data Bar)
If =	1951,249	334,487	(Current Phasor @ Data Bar)
IN =	622,742	319,960	(Neutral Phasor @ Data Bar)
K0 =	0,497	-18,85	([Z0 - Z1] / [3 * Z1])
Zf =	96,929	3,00	(Fault Impedance - [Vf / [If + [k0 * IN]]])

Result

Fault Impedance: 96,929 Ohms [Vf / [If + [k0 * IN]]]

Ilustración 65: Cálculo de impedancia de falta

La impedancia de falta calculada es de $96.797 + j5.073 \Omega$. Aplicando la ecuación (85) para obtener la estimación de la localización de la falta obtenemos:

$$m = \frac{5.073}{23.4667} * 80 = 17.29 \text{ km} \quad (96)$$

Para concluir en la siguiente tabla se expondrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viajera con las corrientes de un extremo	39.4	600	1.5
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	40.39	390	0.97
Método tradicional	17.29	22710	56.8

Tabla 9: Resultados obtenidos del caso 3

7.6.2 Variación de la localización de la falta

En este apartado se va a proceder a realizar las simulaciones relativas al cambio de lugar de realización de la falta. El sistema a simular va a ser el mismo que en el de la ilustración 35, realizando las faltas monofásicas a tierra en diferentes localizaciones a lo largo de la línea.

Para todas ellas la resistencia de falta tendrá un valor de 12Ω . Se comenzará analizando el comportamiento ante una falta muy cercana, en el kilómetro 10 de la línea, y se irá aumentando la distancia progresivamente. En total se harán un total de siete casos diferentes, con ubicación de falta en los kilómetros 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70. Cada uno de estos casos se analizará por los tres métodos explicados en el apartado 7.5.

7.6.2.1 Caso 4

Para este caso se los parámetros relacionados con la resistencia de puesta a tierra serán los siguientes:

Resistencia de falta	12 Ω
Localización donde se produce la falta	10 km

Tabla 10: Características de la resistencia de falta

Para no ser repetitivo en los siguientes casos, solo se mostrarán los datos obtenidos para la estimación de la localización de la falta, por cada uno de los tres métodos. Evitando así la re explicación de estos.

Al analizar la corriente del extremo L mediante la transformada discreta de wavelet se obtiene:

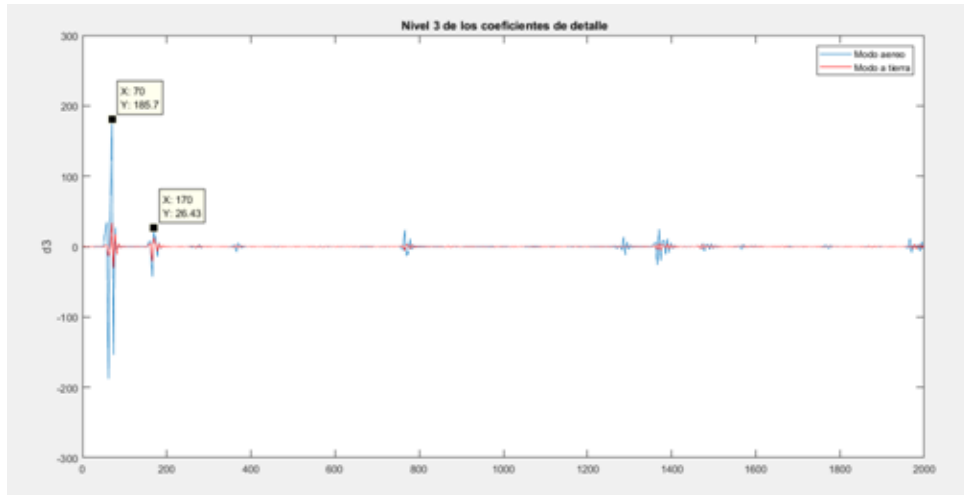


Ilustración 66: Nivel 3 de los coeficientes de detalle del análisis wavelet

Aplicando la ecuación (82) para obtener la estimación de la falta obtenemos:

$$m = \frac{(170-70)*6.667*10^{-7}}{2} * 289689 = 9.66 \text{ km} \quad (97)$$

Teniendo un error de 330 metros, lo que supone un error del 3.4%.

Aplicando la transformada discreta de wavelet a las corrientes obtenidas en ambos extremos se obtiene el tiempo de llegada de la primera onda viajera a cada uno de ellos. Los coeficientes de detalle para el extremo *L* se pueden observar en la ilustración 67 y para el extremo *R* en la ilustración 68:

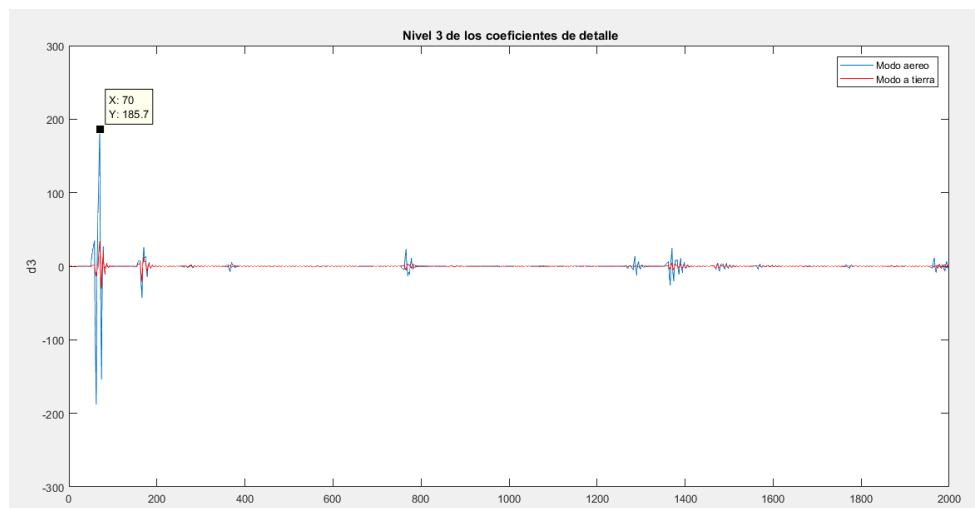


Ilustración 67: Coeficientes de detalle de tercer nivel para la corriente del extremo I

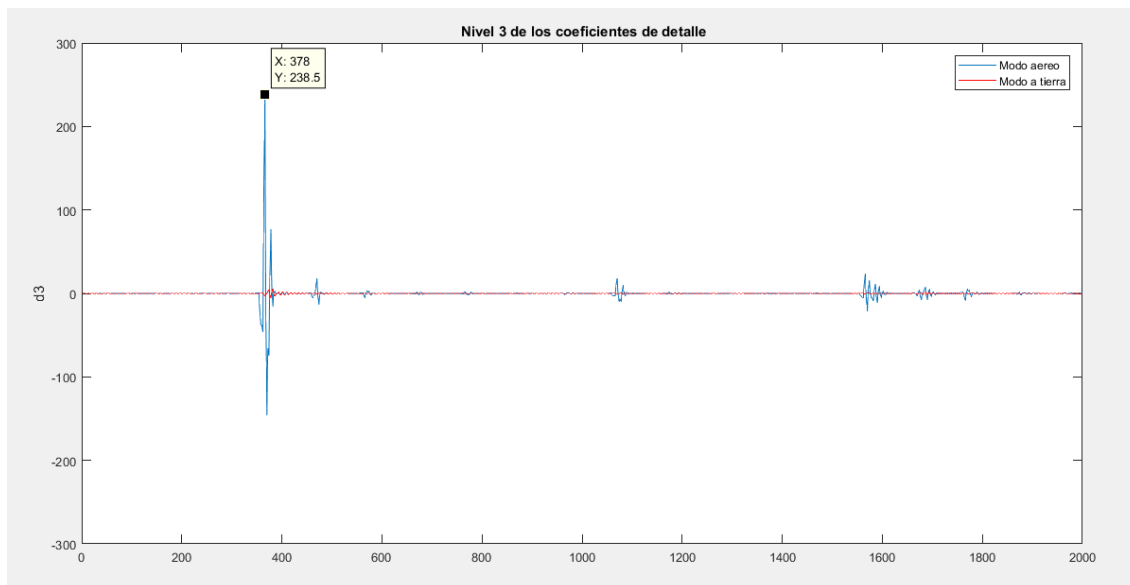


Ilustración 68: Coeficientes de detalle de tercer nivel para la corriente del extremo r

Una vez se han obtenido estos coeficientes, se puede estimar la localización de la falta a través de la ecuación (82):

$$m = \frac{1}{2} * [80 + (70 - 378) * 6.667 * 10^{-7} * 289689] = 10.24 \text{ km} \quad (98)$$

Por último, mediante la calculadora de impedancias del Wavewin una vez se han cargado las señales puede ser estimada la localización de la falta:

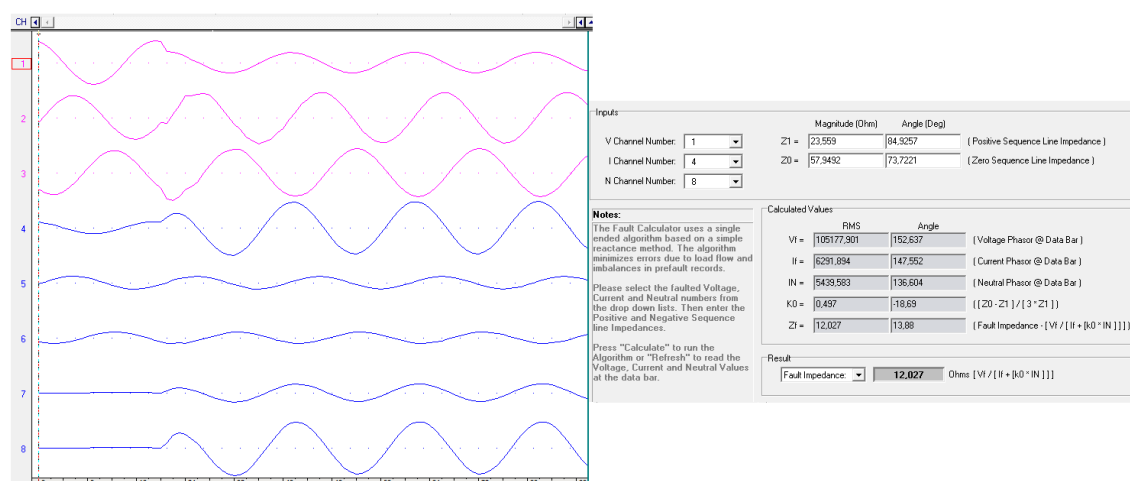


Ilustración 69: Cálculo de la impedancia de falta

Dividiendo la parte imaginaria de esta impedancia entre la parte imaginaria de la impedancia de la línea obtenemos la localización de la falta:

$$m = \frac{2.885}{23.4667} * 80 = 9.83 \text{ km} \quad (99)$$

Para concluir en la siguiente tabla se expondrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viejera con las corrientes de un extremo	9.66	330	3.3
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	10.24	240	2.4
Método tradicional	9.83	170	1.7

Tabla 11: Resultado obtenidos del caso 5

7.6.2.2 Caso 5

En la siguiente tabla se muestran los valores de la falta monofásica a tierra para este caso:

Resistencia de falta	12 Ω
Localización donde se produce la falta	20 km

Tabla 12: Parámetros de la falta monofásica a tierra para el caso 5

Se comenzará estimando la localización de la falta a través de la protección de distancia por onda viajera basada en la corriente de uno de los dos extremos. Se obtienen los tiempos de llegada de la primera onda viajera y de la onda viajera reflejada.

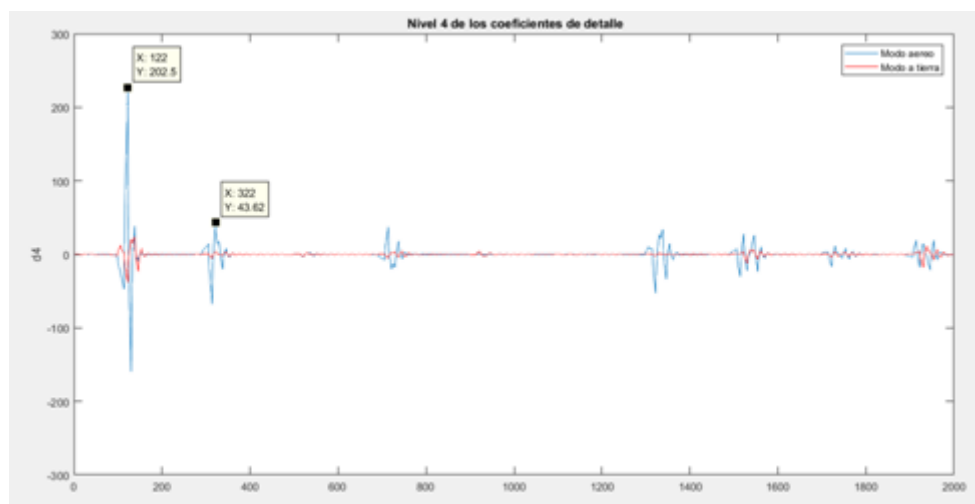


Ilustración 70: Cuarto nivel del coeficiente de detalle para la corriente del extremo I

Una vez obtenido el valor de estos coeficientes, se calcula la localización de la falta a través de la expresión (80):

$$m = \frac{(322-122)*6.667*10^{-7}}{2} * 289689 = 19.32 \text{ km} \quad (100)$$

Este método supone un error de 780 m para este caso.

Mientras que para la estimación de la localización de la falta por el método basado en las corrientes de ambos extremos utilizaremos la expresión (82), en la cual se necesita el coeficiente de detalle de cada una de las corrientes.

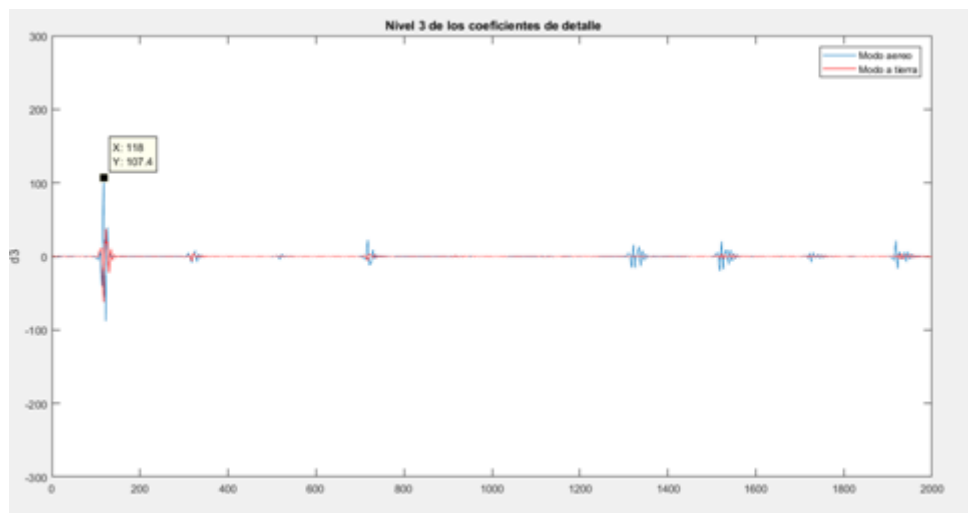


Ilustración 71: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo I

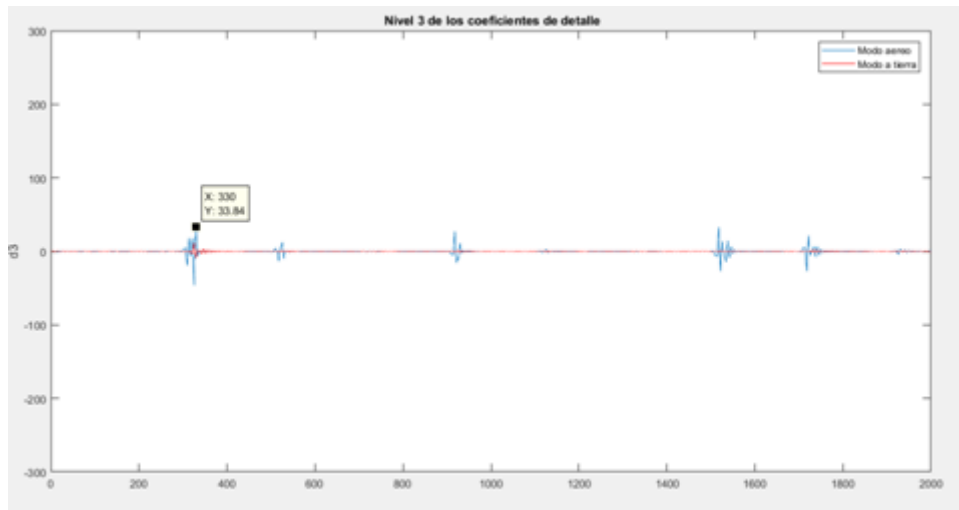


Ilustración 72: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo r

$$m = \frac{1}{2} * [80 + (118 - 330) * 6.667 * 10^{-7} * 289689] = 19.53 \text{ km} \quad (101)$$

Por último, se realiza la estimación de la distancia a través del método tradicional. Para ello mediante Wavewin se calculará la impedancia de falta y se comparará con la impedancia de línea.

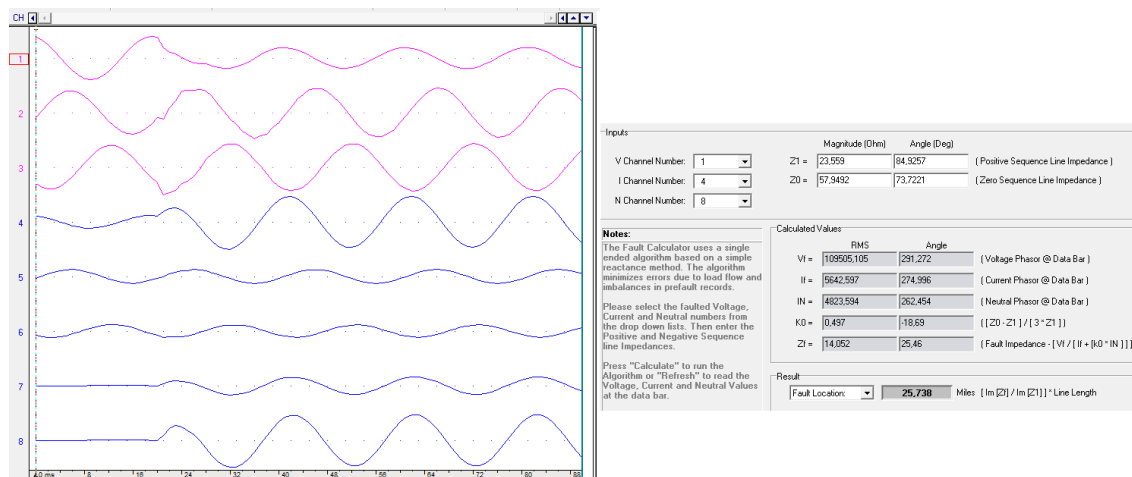


Ilustración 73: Cálculo de la impedancia de falta para el caso 5

Una vez calculado el valor de esta impedancia de falta solo es necesario aplicar la expresión (85) para obtener la localización de la falta:

$$m = \frac{6.04}{23.4667} * 80 = 20.59 \text{ km} \quad (102)$$

Para concluir en la siguiente tabla se expondrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viajera con las corrientes de un extremo	19.32	680	3.4
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	19.53	470	2.35
Método tradicional	20.59	590	2.95

Tabla 13: Resultado del caso 5

7.6.2.3 Caso 6

A continuación se muestran la resistencia de puesta a tierra y la localización real de la falta para este caso:

Resistencia de falta	12 Ω
Localización donde se produce la falta	30 km

Tabla 14: Parámetros de la falta monofásica a tierra para el caso 6

Primero se estimará la localización de la falta a través del método de onda viajera mediante la corriente de un extremo. Mediante la transformada discreta de wavelet obtendremos los coeficientes de detalle de la corriente.

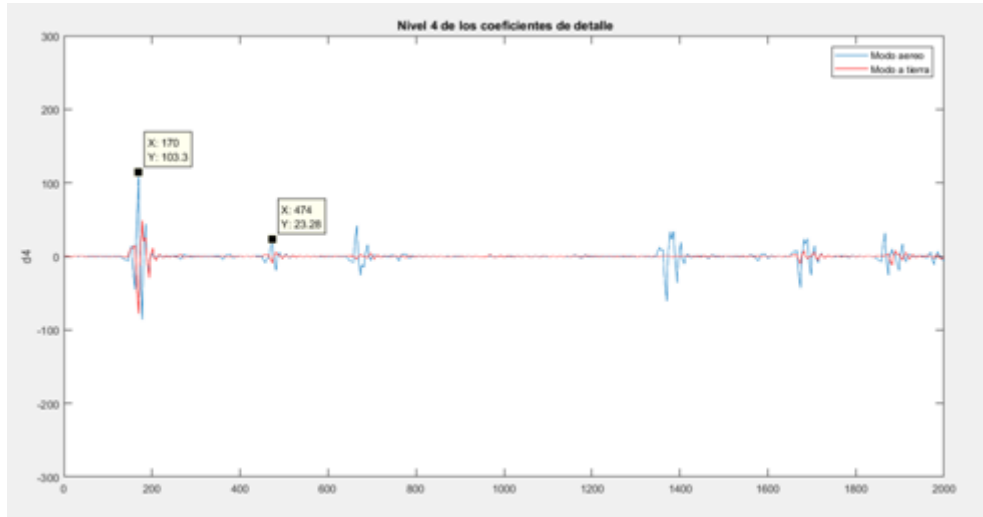


Ilustración 74: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente

Una vez se han obtenido los coeficientes de detalle se puede calcular la localización a partir de la ecuación (80):

$$m = \frac{(474-170) \cdot 6.667 \cdot 10^{-7}}{2} * 289689 = 29.65 \text{ km} \quad (103)$$

Mediante la misma forma de actuación obtendremos los coeficientes de detalle de las corrientes de ambos extremos, para la estimación de la falta a partir del método basado en amabas corrientes:

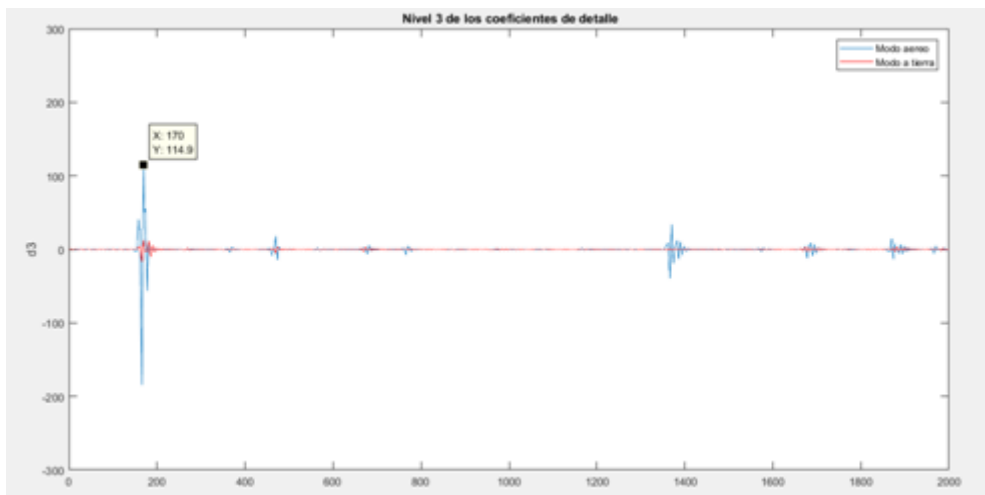


Ilustración 75: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente de I

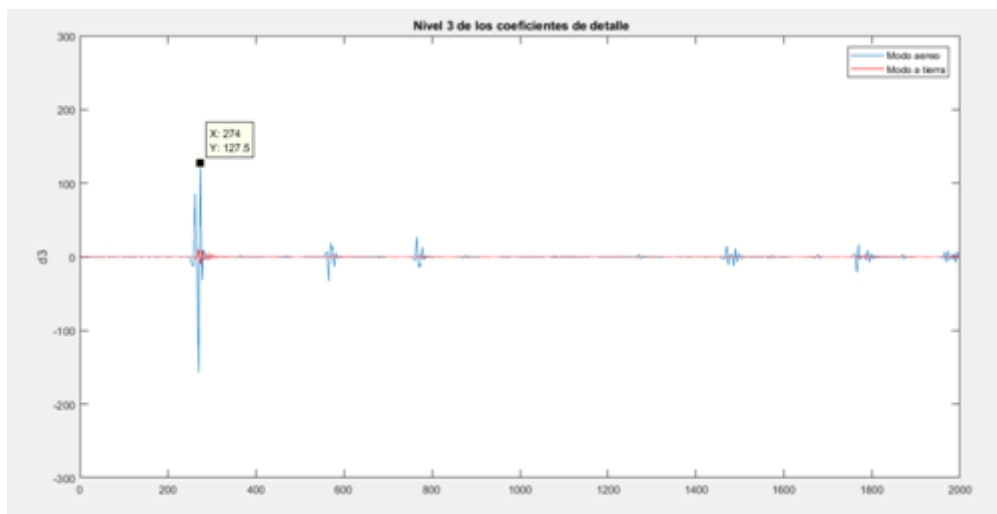


Ilustración 76: Tercer nivel de los coeficientes de detalle de la corriente de r

Una vez han sido obtenidos los coeficientes podemos obtener la estimación de la localización de la falta a través de la siguiente expresión:

$$m = \frac{1}{2} * [80 + (170 - 274) * 6.667 * 10^{-7} * 289689] = 29.96 \text{ km} \quad (104)$$

Suponiendo un error del 0.13%, con una magnitud de 40 metros.

Por último, se estimará la localización a través del cálculo de la impedancia de falta. Para ello utilizaremos Wavewin.

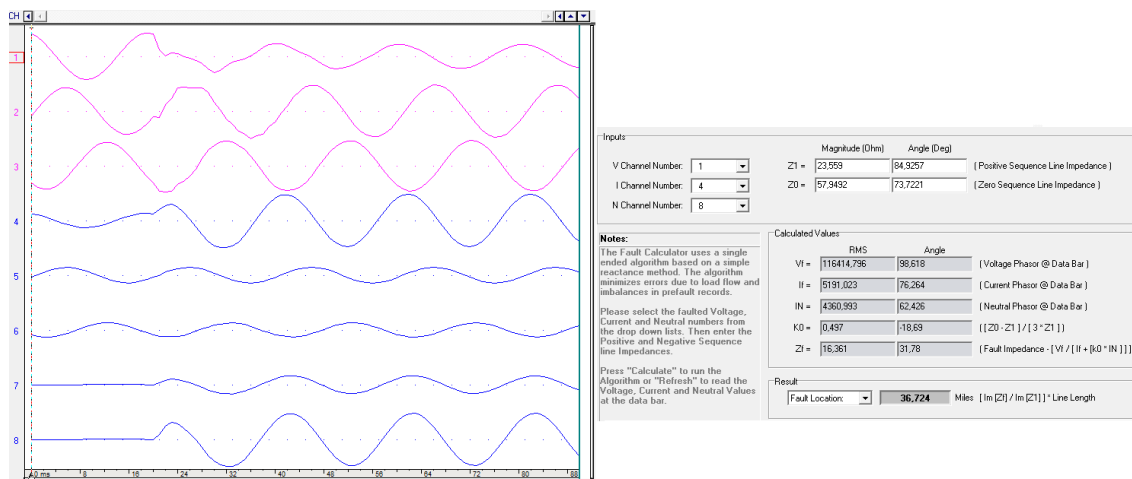


Ilustración 77: Cálculo de la impedancia de falta

$$m = \frac{8.616}{23.4667} * 80 = 29.37 \text{ km} \quad (105)$$

Para concluir en la siguiente tabla se expodrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viejera con las corrientes de un extremo	29.65	350	1.17
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	29.96	40	0.13
Método tradicional	29.37	630	2.1

Tabla 15: Resultados del caso 6

7.6.2.4 Caso 7

En la siguiente tabla podemos observar los principales parámetros de la falta monofásica a tierra de esta simulación:

Resistencia de falta	12 Ω
Localización donde se produce la falta	50 km

Tabla 16: Características de la falta para el caso 7

Se comenzará estimando la localización de la falta a través del método de onda viajera basada en la corriente de uno de los extremos. Para ello se calculan los coeficientes de detalle mediante la transformada discreta de wavelet:

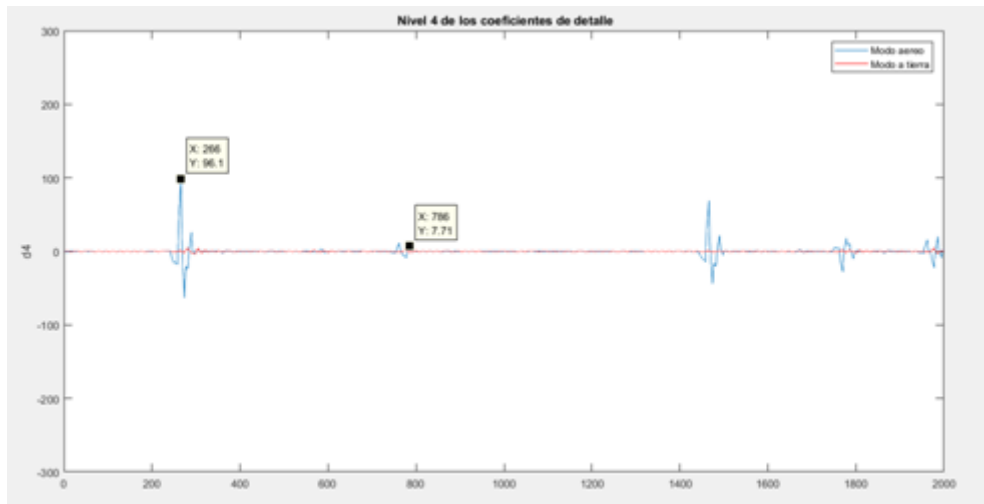


Ilustración 78: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente de I

Una vez se han obtenido los coeficientes de detalle se puede calcular la localización a partir de la ecuación (80):

$$m = \frac{(786-266) \cdot 6.667 \cdot 10^{-7}}{2} * 289689 = 50.22 \text{ km} \quad (106)$$

A continuación se realizará el análisis a partir del método de onda viajera basada en las corrientes de ambos extremos, para ello obtendremos el tiempo de llegada de la primera onda viajera a cada uno de ellos:

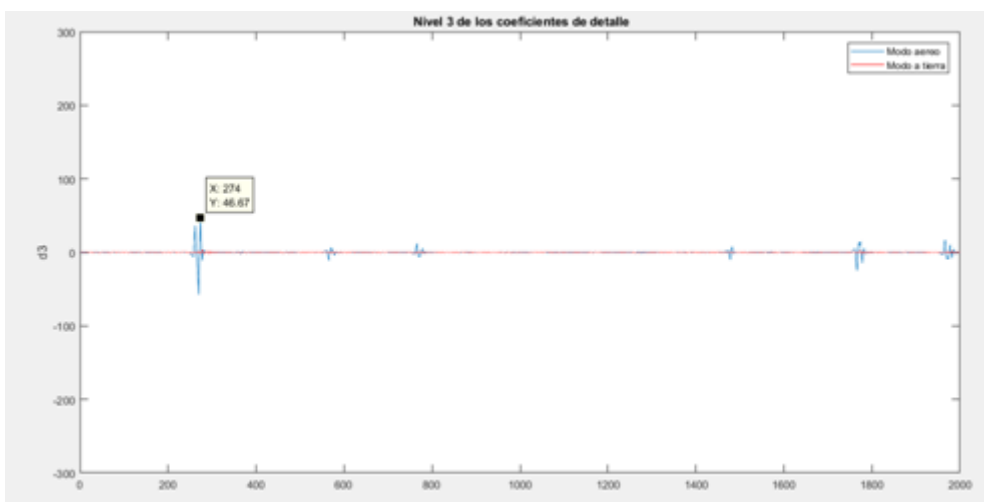


Ilustración 79: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo I

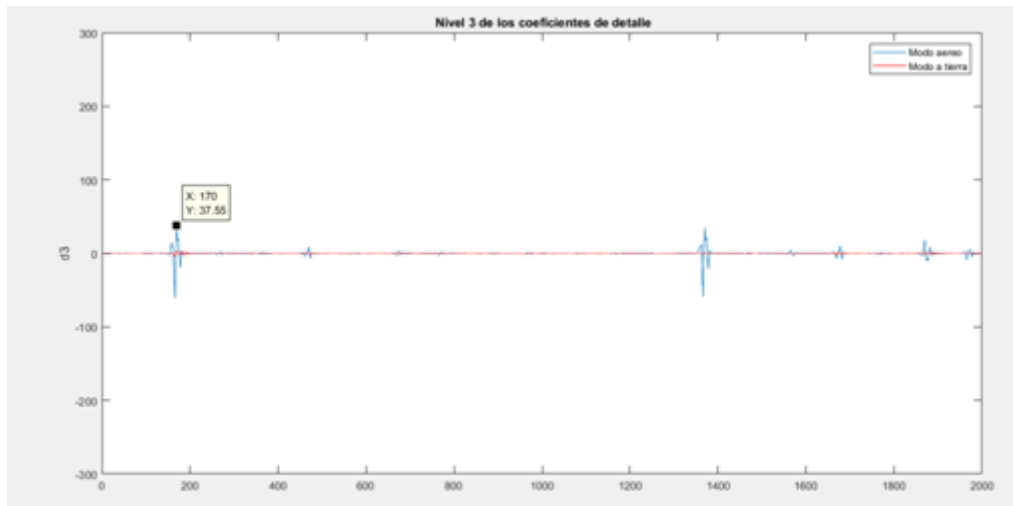


Ilustración 80: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo r

Una vez obtenido el coeficiente de detalle del pico de cada una de las corrientes se estima la localización de la falta a partir de (82):

$$m = \frac{1}{2} * [80 + (274 - 170) * 6.667 * 10^{-7} * 289689] = 50.04 \text{ km} \quad (107)$$

En la ilustración 81 podemos observar el valor de la impedancia de falta.

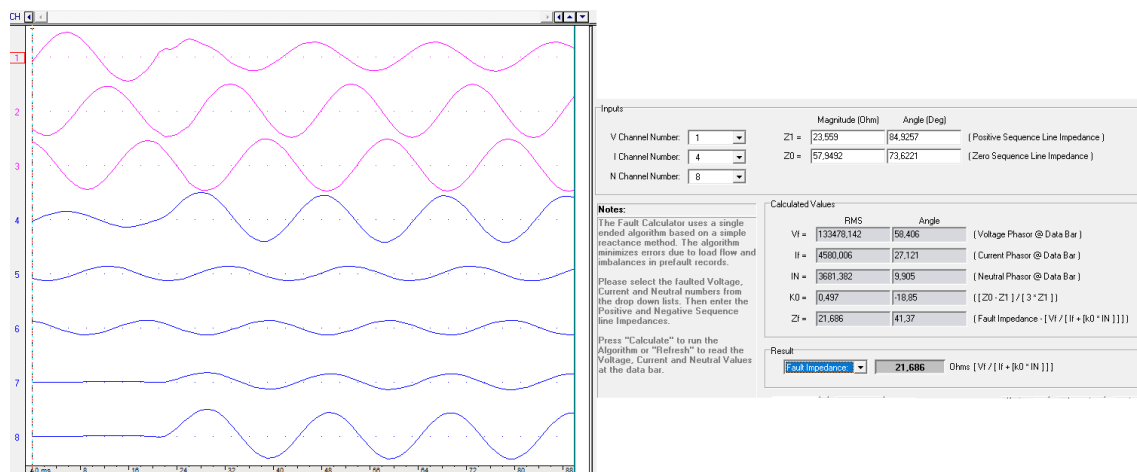


Ilustración 81: Cálculo de la impedancia de falta

Una vez calculado el valor de esta impedancia de falta solo es necesario aplicar la expresión (85) para obtener la localización de la falta:

$$m = \frac{14.3327}{23.4667} * 80 = 48.86 \text{ km} \quad (108)$$

Para concluir en la siguiente tabla se expondrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viejera con las corrientes de un extremo	50.22	220	0.44
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	50.04	40	0.08
Método tradicional	48.68	1320	2.64

Tabla 17: Resultados del caso 7

7.6.2.5 Caso 8

A continuación se muestran las características principales de esta simulación:

Resistencia de falta	12 Ω
Localización donde se produce la falta	60 km

Tabla 18: Características de la falta del caso 8

Comenzaremos estimando la localización de la falta mediante el método de onda viajera basado en la corriente de un extremo. Para ello obtener los coeficientes de detalle de la primera onda reflejada y de la primera onda viajera que aparece en el extremo.

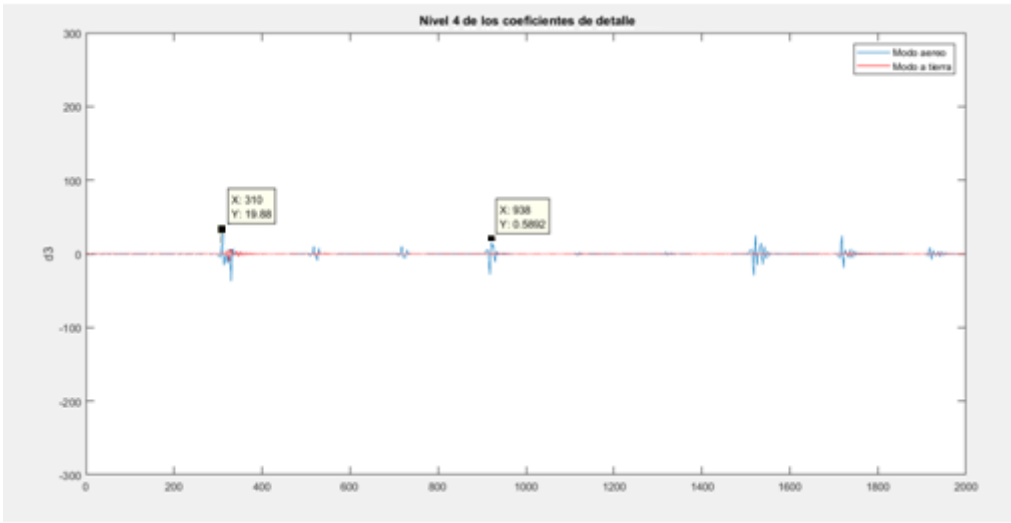


Ilustración 82: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente de I

Una vez se tienen los valores de estos coeficientes solo es necesario introducirlos en la ecuación (80):

$$m = \frac{(938-310) \cdot 6.667 \cdot 10^{-7}}{2} \cdot 289689 = 60.64 \text{ km} \quad (109)$$

Seguidamente se estimará la localización de la falta a través del método de onda viajera basado en la corriente de ambos extremos. Para ello se calcularán los tiempos de llegada de la onda viajera a cada uno de los extremos.

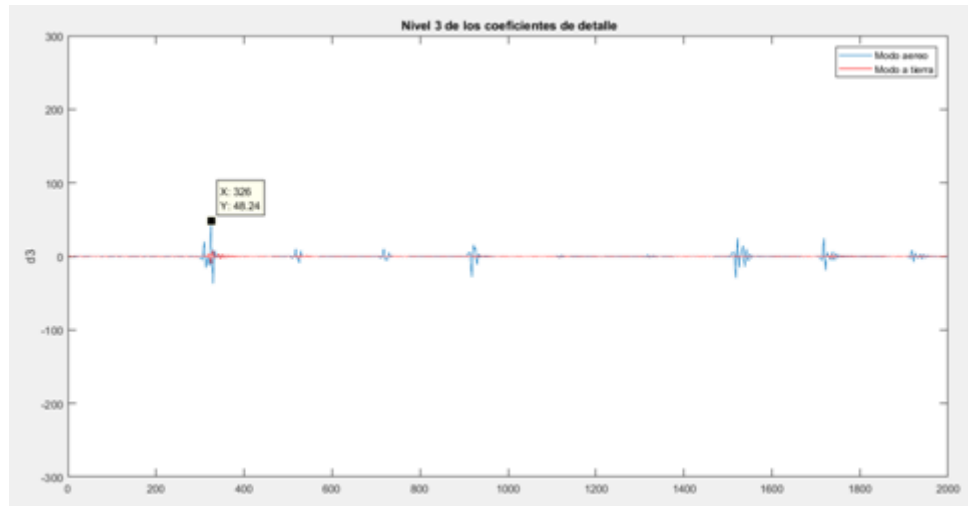


Ilustración 83: Coeficiente de detalle de la corriente del extremo l

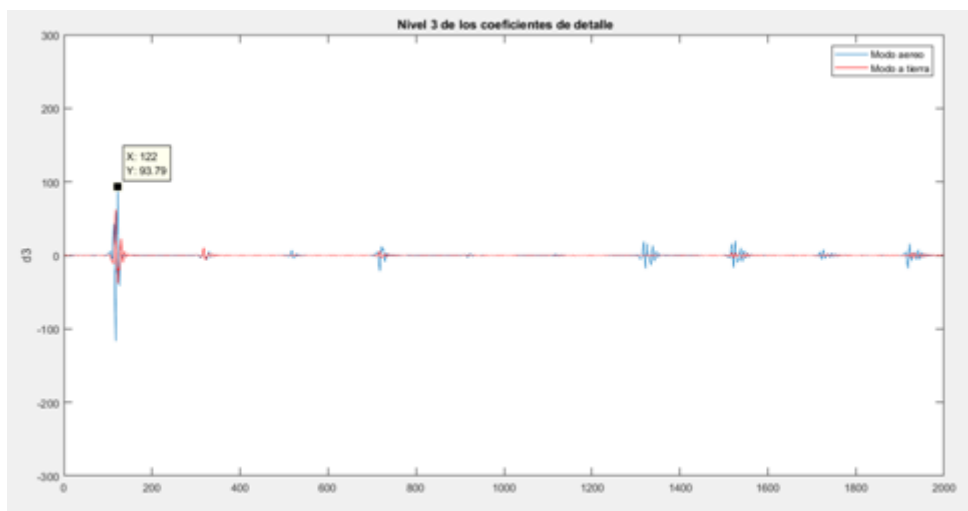


Ilustración 84: Coeficiente de detalle de la corriente del extremo r

Una vez se han obtenido estos coeficientes la localización de la falta es calculada a través de:

$$m = \frac{1}{2} \cdot [80 + (326 - 122) \cdot 6.667 \cdot 10^{-7} \cdot 289689] = 59.7 \text{ km} \quad (110)$$

A continuación vamos a realizar el análisis por el método tradicional, para ello calcularemos la impedancia de la falta a través de Wavewin:

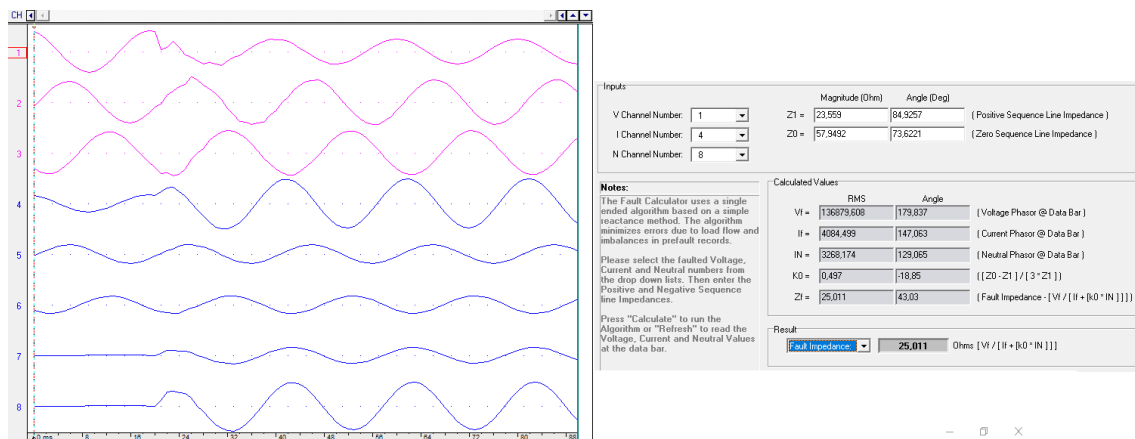


Ilustración 85: Cálculo de la impedancia de falta

El valor de la impedancia de falta obtenido es de 25.011 <43.03Ω. Tomando únicamente el valor de la reactancia de la falta, obtenemos la localización de la falta como:

$$m = \frac{17.067}{23.4667} * 80 = 58.18 \text{ km} \quad (111)$$

Para concluir en la siguiente tabla se expondrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viejera con las corrientes de un extremo	60.64	360	0.6
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	59.7	300	0.5
Método tradicional	58.18	1820	3.03

Tabla 19: Resultados del caso 8

7.6.2.6 Caso 9

En la siguiente tabla se muestran las características de este ensayo:

Resistencia de falta	12 Ω
Localización donde se produce la falta	70 km

Tabla 20: Características de la falta del caso 9

Primero estimaremos la localización de la falta a través de la protección de distancia de onda viajera basada en la corriente de uno de los extremos. En las siguientes ilustraciones se puede

observar el valor de los coeficientes de detalle para la primera onda viajera y para la primera onda viajera reflejada.

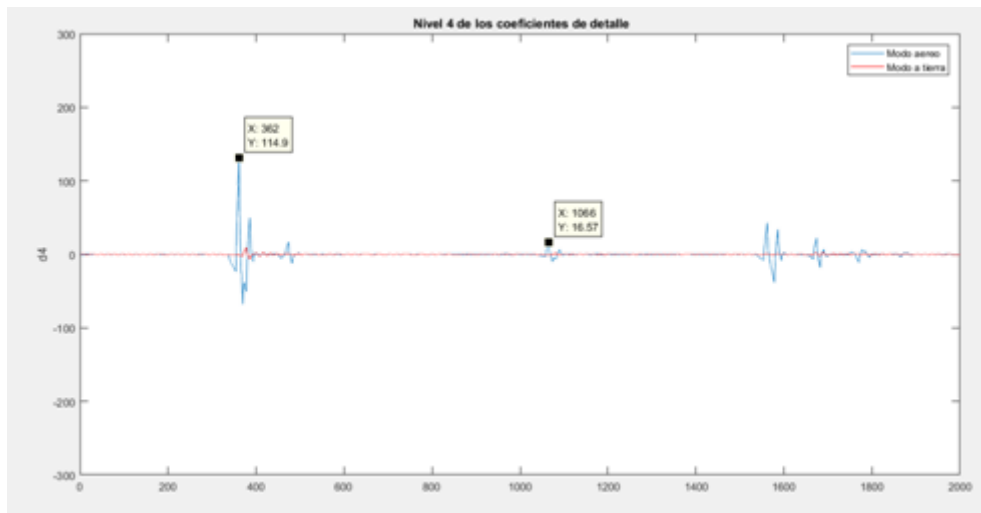


Ilustración 86: Cuarto nivel de los coeficientes de detalle de la corriente del extremo I

Una vez se tienen los valores de estos coeficientes solo es necesario introducirlos en la ecuación (80):

$$m = \frac{(1066-362) \cdot 6.667 \cdot 10^{-7}}{2} * 289689 = 69.46 \text{ km} \quad (112)$$

A continuación para estimar la localización de la falta basada en la protección de distancia por onda viajera basada en ambos extremos, se calculan los coeficientes de detalle de la primera onda viajera que llega a cada uno de los extremos.

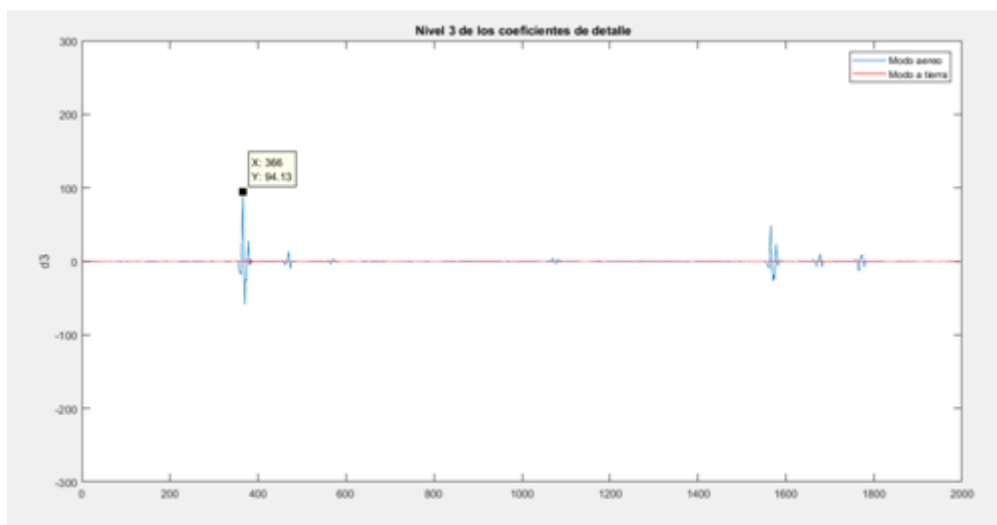


Ilustración 87: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo I

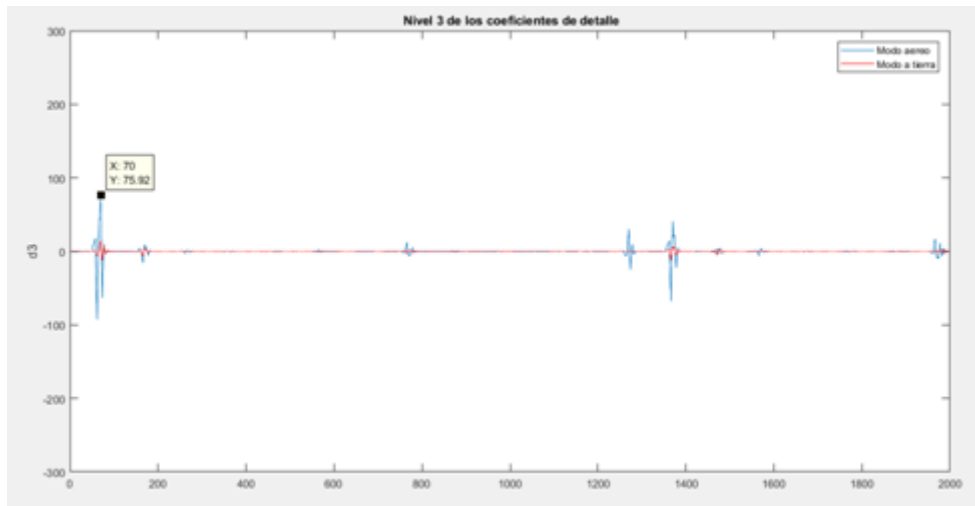


Ilustración 88: Coeficientes de detalle de la corriente del extremo r

Una vez se han obtenido estos coeficientes la localización de la falta es calculada a través de:

$$m = \frac{1}{2} * [80 + (366 - 70) * 6.667 * 10^{-7} * 289689] = 69.55 \text{ km} \quad (113)$$

Por último, vamos a proceder a realizar el cálculo de la impedancia de falta mediante Wavewin. En la siguiente ilustración podemos ver el valor de la impedancia de falta.

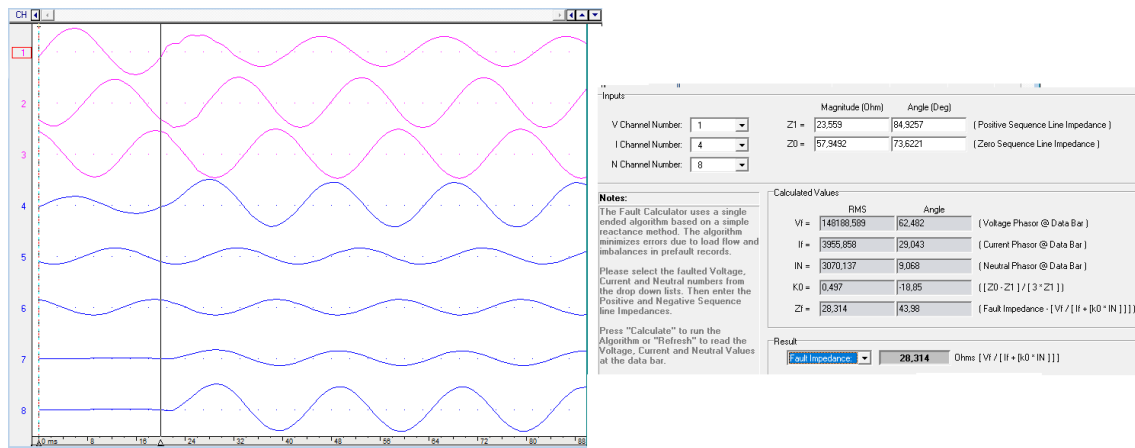


Ilustración 89: Cálculo de la impedancia de falta

Aplicando la expresión (85) obtenemos la estimación de la localización de la falta:

$$m = \frac{19.6614}{23.4667} * 80 = 67.03 \text{ km} \quad (114)$$

Para concluir en la siguiente tabla se expondrá la estimación de la localización de la falta por cada uno de los métodos y su correspondiente error:

Método	Estimación de la falta [km]	Error [m]	Error [%]
Mediante onda viejera con las corrientes de un extremo	69.46	540	0.77
Mediante onda viajera con las corrientes de ambos extremos	69.55	450	0.64
Método tradicional	67.03	2970	4.24

Tabla 21: Resultados del caso 9

CAPITULO 8

CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en este Trabajo de Fin de Grado han sido extraídas a partir del capítulo 7. Se pueden sacar dos conclusiones principales debido a los escenarios simulados, dando respuesta así a los objetivos propuestos en el capítulo 1.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en el apartado 7.6.1, mostrados en la tabla 22, se puede afirmar que la protección de distancia por onda viajera es muy fiable y precisa para todo el rango de valores de la impedancia de falta, ya que localiza la falta en el mismo punto independientemente del valor de la resistencia. Del mismo modo, se puede afirmar que la protección de distancia por el método tradicional actúa con grandes errores para faltas monofásicas con resistencias a tierra elevadas.

Protección de distancia	Valor de la resistencia [Ω]	Localización real de la falta [km]	Estimación de la localización [km]	Error cometido [m]
TW1	$1 \cdot 10^{-7}$	40	39.4	400
	12	40	39.4	400
	150	40	39.4	400
TW2	$1 \cdot 10^{-7}$	40	40.39	390
	12	40	40.39	390
	150	40	40.39	390
Tradicional	$1 \cdot 10^{-7}$	40	37.56	2440
	12	40	37.55	2450
	150	40	17.29	23710

Tabla 22: Resumen de los resultados obtenidos ante la variación de la resistencia de falta

Siendo TW1 la protección de distancia por onda viajera basada en la corriente del extremo L , TW2 la protección de distancia por onda viajera basada en la corriente de ambos extremos y Tradicional la protección de distancia basada en las tensiones y corrientes del extremo de la línea L .

La protección de distancia por ondas viajeras tanto basada en un único extremo como la basada en dos extremos tienen un error en torno a los 400 metros para estos casos. La protección de distancia tradicional tiene un error en torno a los 2 kilómetros y medio para faltas con resistencias pequeñas y moderadas. Pero con el ensayo a elevadas resistencias de falta se verifica su mal funcionamiento, estimando la localización de la falta con un error del 56.8%.

El error cometido por el método tradicional es hasta cinco veces mayor que el cometido por los métodos por onda viajera pero para resistencias de falta con un valor elevado el error cometido llega a ser hasta 56 veces mayor. Esto lo podemos observar en el siguiente gráfico:

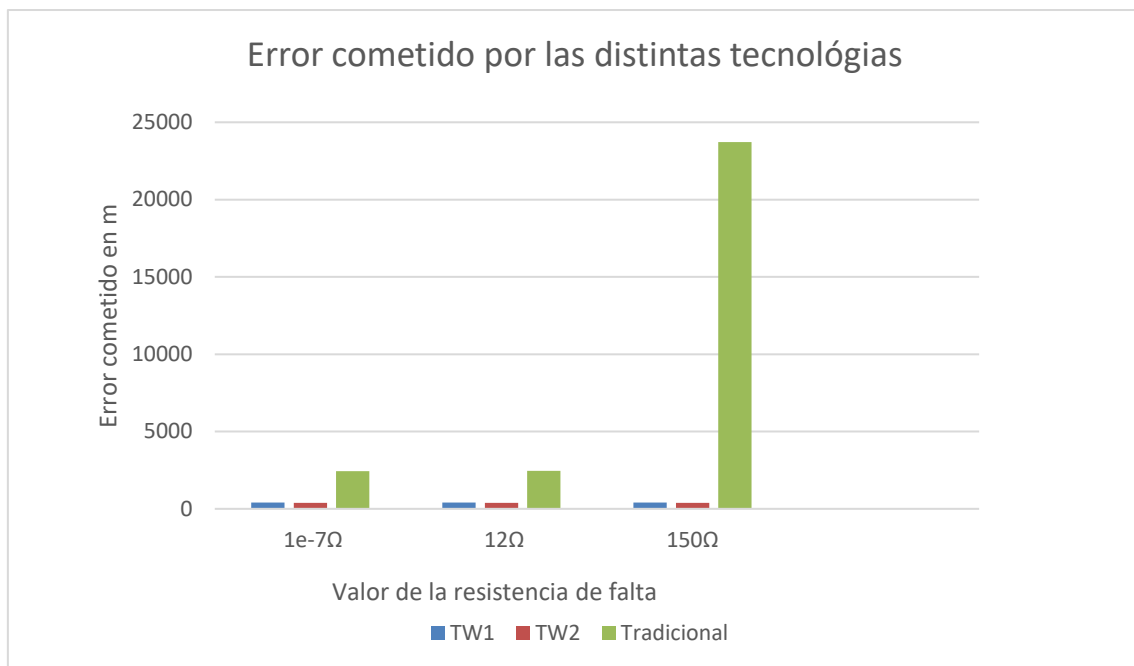


Gráfico 1: Comparativa del error cometido por los métodos ante una resistencia de falta variable

La segunda conclusión obtenida trata sobre las simulaciones realizadas en el apartado 7.6.2. Analizando los resultados obtenidos se puede verificar el correcto funcionamiento de la protección de distancia por onda viajera debido a que el error más grande obtenido no supera los 680 metros.

Protección de distancia	Localización real de la falta [km]	Valor de la resistencia [Ω]	Estimación de la localización [km]	Error cometido [m]
TW1	10	12	9.66	330
	20	12	19.32	680
	30	12	29.65	350
	40	12	39.4	600
	50	12	50.22	220
	60	12	60.64	640
	70	12	69.46	540
TW2	10	12	10.24	240
	20	12	19.53	470
	30	12	29.96	40
	40	12	40.39	390
	50	12	50.04	40
	60	12	59.7	300
	70	12	69.55	450
Tradicional	10	12	9.83	170
	20	12	20.59	410
	30	12	29.37	630
	40	12	37.55	450
	50	12	48.68	1132
	60	12	58.18	1182
	70	12	67.03	2297

Tabla 23: Resumen de los resultados obtenidos en la variación de la localización de la falta

Como podemos observar la protección de distancia tradicional tiene un buen funcionamiento para faltas cercanas, anteriores a la mitad de la línea. Cuando la distancia va aumentando también aumenta el error en la estimación.

La protección de distancia por onda viajera tiene un comportamiento deseable, ya que en ningún caso dista mucho de la localización real de la falta. Cabe destacar los dos casos en la que la protección basándose en la corriente de los dos extremos estima la localización de la falta con error de 40 metros.

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento parejo de las tres tecnologías ante faltas cercanas, pero al aumentar la distancia de la localización de la falta el método tradicional va cometiendo más errores mientras que los basados en ondas viajeras mantienen unos errores razonables.

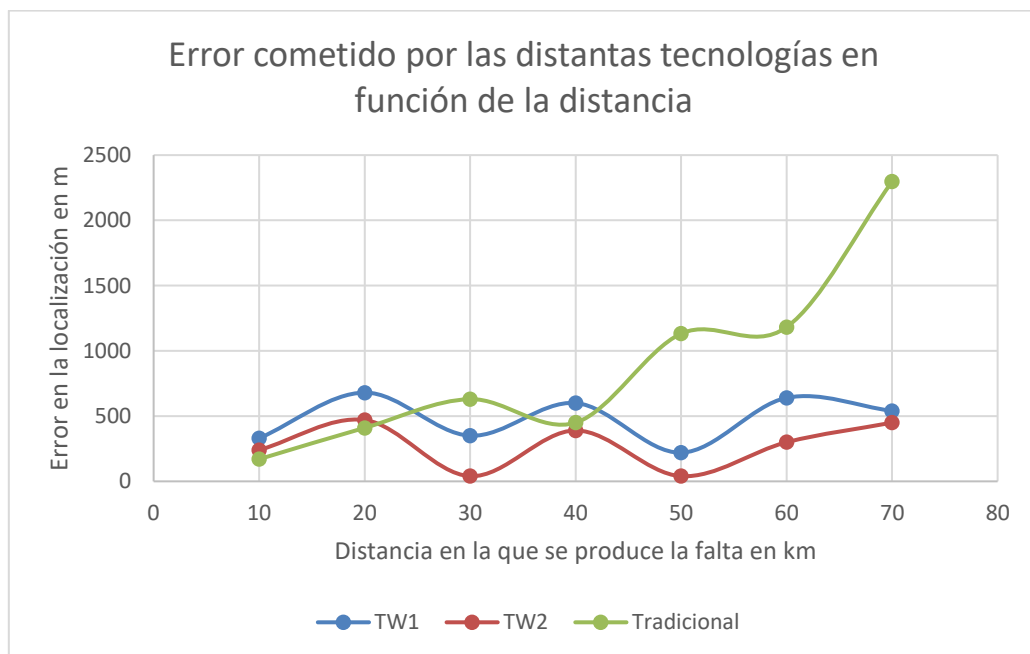


Gráfico2: Error cometido por las protecciones ante la variación de la localización de la falta

Las conclusiones obtenidas con respecto al comportamiento de las protecciones respecto a la variación de la distancia de la falta con una resistencia de 12Ω pueden ser extrapolados al comportamiento que tendría la protección ante resistencias de falta pequeñas.

Podemos asegurar que el método tradicional ante faltas a tierra con valores elevados de la resistencia cometería grandes errores en la estimación de la falta. Siendo estos muy elevados para faltas lejanas.

Para faltas muy cercanas, la protección por el método tradicional se comporta mejor que por los métodos de onda viajera. No obstante, el comportamiento de estos es correcto no superando errores en la estimación de la falta en más de 700 metros.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas muestran el mejor funcionamiento de las protecciones de distancia basadas en onda viajera frente al método tradicional. Todas las estimaciones de falta realizadas por los métodos de onda viajera darían como resultado la revisión por parte del grupo de mantenimiento de uno o como mucho dos vanos para reparar el fallo. Mientras que con la protección por el método tradicional se perderán varias jornadas hasta localizar realmente el origen de la avería.

8.2 Trabajos futuros

Como sugerencia para la continuación del estudio sobre la protección de distancia por onda viajera se proponen los siguientes trabajos:

- Estudio e inclusión del modelo de un transformador real de intensidad
- Con un modelo de transformador de intensidad, verificar el comportamiento de cada método en las condiciones de saturación, ya que las ondas viajeras son muy rápidas y no deberían verse afectadas por la saturación.
- Verificación del comportamiento de los localizadores de falta con transformadores de tensión capacitivos.
- Comparativa con registros reales
- Realización de todo tipo de faltas, variando la fase afectada en la falta monofásica, y generando cortocircuitos bifásicos y trifásicos.

Bibliografía

- [1]. Schweitzer E, Guzmán A, Mynam M, Skendzic V, Kasztenny B. A new traveling wave fault locating algorithm for line current differential relays. Lecture presented at; 2014; Copenhagen, Denmark.
- [2]. Schweitzer E, Guzmán A, Mynam M, Skendzic V, Kasztenny B. Accurate single end-fault location and line-length estimation using traveling waves. Lecture presented at; 2017; Edinburgh, United Kingdom.
- [3]. El Halabi NGarcía-Gracia M. Localización de faltas en redes inteligentes de distribución eléctrica [Tesis]. Universidad de Zaragoza; 2010.
- [4]. López G, Gonzalez J, Díez A, Isaac I, Cardona H. Detección y localización de fallas en sistemas HVDC usando wavelet. Revista investigaciones aplicadas. 2008;3.
- [5]. Naidu MKamaraju V. High voltage engineering. 1st ed. New York: McGraw-Hill; 1996.
- [6]. Análisis de sobrevoltajes a frecuencia industrial y por maniobra en líneas de transmisión a nivel de 500 kV. Escuela politécnica nacional. 2016;1.
- [7]. Vázquez ECastruita J. Protección de sistemas eléctricos mediante reconocimiento de patrones de onda viajera. Ingenierías. 2006;IX(30).
- [8]. Zimmerman KCostello D. Impedance-based fault location experience. SEL journal of reliable power. 2010;1(1).
- [9]. Quintero I. Desarrollo de un modelo para la localización de fallas en sistemas de transmisión de energía eléctrica utilizando técnicas de inteligencia artificial [Tesis]. Universidad Nacional de Colombia; 2010.
- [10]. M. Aurangzeb, P. A. Crossley and P. Gale, "Fault location on a transmission line using high frequency travelling waves measured at a single line end," *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, 2000, pp. 2437-2442 vol.4.doi: 10.1109/PESW.2000.847191
- [11]. Schweitzer E, Guzmán A, Mynam V, Skendzic V. Locating faults by the traveling waves they launch. Lecture presented at; 2014; Brooklyn Center, Minnesota.
- [12]. Kasztenny B, Guzmán A, Fischer N, Mynan V, Taylor D. Practical setting considerations for protective relays that use incremental quantities and traveling waves. Lecture presented at; 2016; Spokane, Washington.
- [13]. Schweitzer E, Kasztenny B, Mynam V, Guzmán A, Fischer N, Skendzic V. Defining and measuring the performance of line protective relays. Lecture presented at; 2017; Spokane, Washington.
- [14]. SEL-T400L Time-domain line protection data sheet. 1st ed. 2016.
- [15]. SEL-411L Data sheet. 1st ed. 2016.
- [16]. SEL-411L Relay- Protection and automation system instruction manual. 1st ed. 2016.
- [17]. Idárraga, G.; Valencia, R.; Hernandez, J. Algoritmos Para Localización De Fallas En Líneas De Transmisión, Análisis Para El Caso Colombiano. Dyna, 2004: 71 (143); Universidad nacional de Colombia Medellin.

- [18]. Moreto, M. Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: Uma metodologia baseada em redes neurais artificiais [Tesis]. Universidade Federal Do Rio Grande Do Ul Escola de Engenharia; 2005
- [19]. Schweitzer E, Whitehead D, Zweigle G, Skendzic V, Achanta V. Millisecond, microsecond, nanosecond: What can we do with more precise time?. Lecture presented at; 2016; College Station, Texas.
- [20]. R. H. Park, "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines, Generalized Method of Analysis – Part I," *Winter Convention of the A. I. E. E.*, pp. 716-730, New York, January 28-February 1, 1929.
- [21]. de Castro Fernández R. Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos [Licenciatura]. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla; 2002.
- [22]. Liang J, Elangovan S, Devotta J. Application of wavelet transform in travelling wave protection. Lecture presented at; 2000; Singapore.
- [23]. Shahmordi S. Detection of fault location on transmission systems using Wavelet transform. *International Academic Journal of Science and Engineering*. 2016;3(4):23-32.
- [24]. Chang J. Single ended traveling wave based fault location usisng discrete wavelet transform. University of Kentucky; 2014.
- [25]. Synchrophasors [Internet]. selinc.com. 2017 [cited 12 April 2017]. Available from: <https://selinc.com/es/solutions/synchrophasors/>
- [26]. Podestá R. Astronomía de posición. 1st ed. Dep. de Geofísica y Astronomía: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; 2017.
- [27]. Fodero K, Huntley C, Whitehead D. Secure, Wide-Area Time Synchronnization. Lecture presented at; 2010; Spokane, Washington.
- [28]. Fischer N, Skendzic V, Moxley R, Needs J. Protective relay traveling wave fault location. Lecture presented at; 2012; Birmingham, United Kingdom.
- [29]. Marx S, Johnson B, Guzmán A, Skendzic V, Mynam M. Traveling wave fault location in protective relays: Design, testing, and results. Lecture presented at; 2013; Atlanta,Georgia.
- [30]. Huerta E. Algoritmos de localización de fallas en líneas de transimisión. *Ingenierías*. 2015;18(66).
- [31]. Lopes F, Fernádes D, Neves L. Fault location on transmission lines based on travelling waves. Lecture presented at; 2011; Delft, Netherlands.
- [32]. Conductores Desnudos de Aluminio Acero para Líneas Eléctricas Aéreas. (2017). [Especificación técnica].
- [33]. Power transmission line fault location based on currente traveling waves. (2008). Helsinki University of Technology.

ANEXO I: SINCRONIZACIÓN DEL TIEMPO.

En este anexo se va a explicar cómo el relé es capaz de sincronizar el tiempo. Para ello se hará una introducción en la que se expondrá la tecnología que es utilizada en estos momentos. Además, se tratarán los diferentes protocolos para distribuir el tiempo. En este anexo se tratarán las ventajas y desventajas de diferentes métodos de proporcionar el tiempo. El anexo se centrará en el sistema de posicionamiento global (GPS), explicando cómo puede ser interferido. Por último, se plantearen métodos basados en el GPS que evitaran recibir un tiempo erróneo cuando este falle.

Hoy en día tanto las protecciones eléctricas como los sistemas de control y monitorización de datos necesitan la disponibilidad de un tiempo con alta precisión. Esta precisión en el tiempo es generalmente proporcionada por los relojes de sistema de posición global (GPS). La disponibilidad de tiempo preciso y de forma económica desde el sistema de posicionamiento global ha hecho que las subestaciones, centros de control e incluso los dispositivos remotos dispongan de la señal de este tiempo tan preciso. Esta tecnología ha tenido un amplio despliegue, permitiendo aplicaciones que antes eran muy costosas o que simplemente no eran posibles sin esta tecnología. El uso de fasores sincronizados es un ejemplo de aplicación que no sería posible sin tener un tiempo con gran precisión. Los fasores sincronizados proporcionan mediciones en tiempo real de las cantidades eléctricas de todo un sistema de potencia, sus aplicaciones incluyen el control y registro de disturbios en áreas amplias, además de la validación del modelo del sistema o la determinación de los márgenes de estabilidad.

El papel que desempeña este tiempo de precisión ha ido cambiando desde solo ser utilizado para proporcionar referencias de tiempo para registrar eventos, a ser una señal de entrada de crucial importancia en el esquema de protección.

A continuación, se va a proceder a explicar las escalas de tiempos atómicos. El tiempo atómico es un estándar de alta precisión para medir el tiempo. Los principales tiempos atómicos son: el tiempo atómico internacional (TAI), el tiempo universal coordinado (UTC) y el tiempo del sistema de posición global (GPS).

El TAI es un tiempo con una precisión extrema, basado en la ponderación del tiempo promedio de 200 relojes atómicos de cesio. Este es un tiempo utilizado para hacer medidas en experimentos relativistas. El UTC se creó para hacer el TAI accesible a astrónomos, navegantes, físicos e ingenieros de todo el mundo. Por último, el tiempo GPS comenzó en 1980 y fue generado por el observatorio naval de USA, este tiempo no depende de la rotación de la tierra si no de un satélite, el tiempo GPS está siempre 19 segundos por detrás del TAI. A mediados de 2009 el tiempo GPS estaba por delante de UTC por 15 segundos, como muestra la ilustración 90

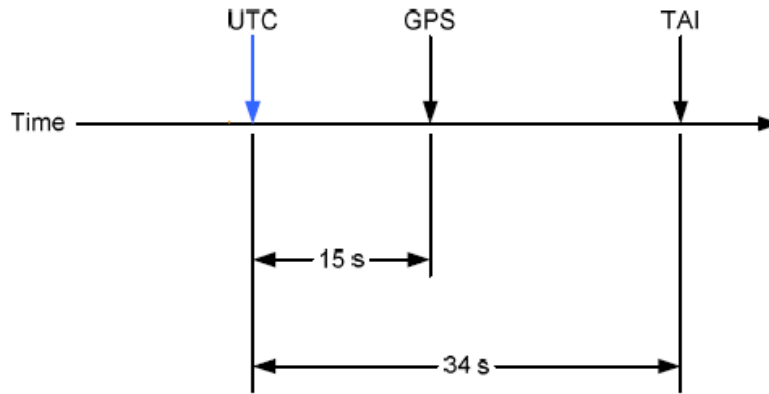


Ilustración 90: Escala de tiempos atómicos

Para nuestro proyecto se ha utilizado como referencia el tiempo GPS, pero utilizar un tiempo común de referencia solo es el comienzo. El tiempo GPS se obtiene a través de un reloj GPS, el cual recoge las señales de radio frecuencia de los satélites. Seguidamente necesitamos la manera de distribuir el tiempo de referencia aguas abajo a los dispositivos electrónicos inteligentes (IEDs). A continuación, se explicarán los protocolos más importantes comentando sus ventajas e inconvenientes.

El formato más comúnmente utilizado para distribuir la información de la sincronización del tiempo está definido en la IRIG-ESTÁNDAR 200-04. IRIG-B como queda descrito en el IRIG-ESTÁNDAR 200-04 es un formato muy popular para distribuir señales de tiempo a los IEDs. Es fácil de generar, entender y decodificar. Se puede distribuir a través de cables telefónicos, cables coaxiales, fibra, microondas, alta frecuencia y otros canales de radio. Los formatos más comunes utilizados en la industrial son IRIG-B002, el cual es modulado y el IRIG-B000 que no tiene modulación. EL formato de código del tiempo para ambos es un BCD (HH, MM, SS, DDD) donde se indica las horas, los minutos, los segundos y el número de día del año que es. En la ilustración 91 podemos ver cómo sería una distribución basada en IRIG-B:

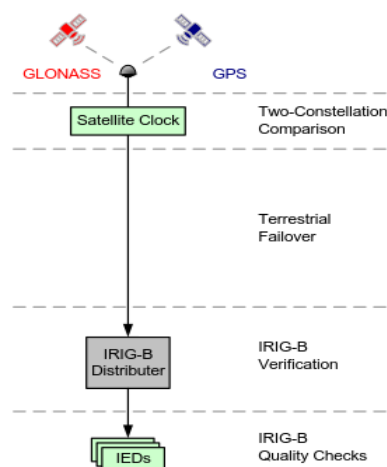


Ilustración 91: Distribución de tiempos basada en el protocolo IRIG-B

Otra posibilidad alternativa al IRIG-B es el ESTÁNDAR IEEE 1588, el cual define un método para compartir el tiempo con múltiples elementos de red. Este método se basa en la comunicación del tiempo de un reloj maestro a través de red Ethernet. Este estándar también define un protocolo de tiempo preciso que se utiliza para calibrar los retrasos introducidos por los caminos de comunicación de la red. A continuación, podemos observar un esquema de esta configuración:

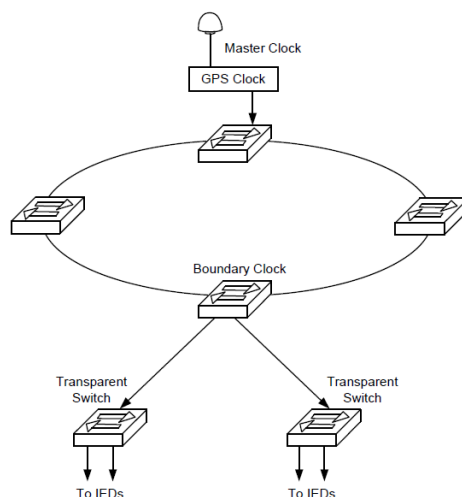


Ilustración 92: Distribución de tiempos basada en el protocolo IEEE 1588

Las principales ventajas del método de distribución de tiempo IEEE 1588 frente al IRIG-B son:

- La eliminación de la necesidad de tener cables separados de distribución de tiempo
- Cuando se utiliza más de un reloj maestro, se consigue la redundancia de fuente.

Por el contrario, tiene como desventaja que es un protocolo basado en Ethernet y por lo tanto no apoya a los dispositivos de legado IRIG-B o productos que no son compatibles con Ethernet.

El siguiente tema que se va a tratar son las vulnerabilidades del GPS, se examinarán las posibles causas y/o fuentes de interferencia de la señal GPS. Cabe destacar que tanto el sistema GPS como los relojes satélite GPS utilizados en las subestaciones hasta la fecha han proporcionado tiempo de precisión y con gran fiabilidad. Para aumentar más la fiabilidad de cualquier sistema, es importante entender todas las posibles fuentes de interferencia. A continuación, se expondrán las principales que pueden afectar al sistema GPS, aunque afortunadamente no es habitual que sucedan.

Se sabe que los sistemas GPS pueden ser destruidos por tormentas electromagnéticas, causadas por erupciones solares. Estas tormentas son causadas por partículas cargadas eléctricamente y campos electromagnéticos producidos por el sol durante la erupción. Una de las tormentas electromagnéticas más importantes que se produjo en el 28 de octubre de 2003, provocó que la caída de algunas unidades de GPS durante más de 19 horas.

También existen interferencias intencionadas del GPS que pueden afectar al sistema. La intensidad de la señal GPS medida en la superficie de la tierra tiene un valor sobre -160 dBw.

Esta señal puede ser fácilmente bloqueada destruyendo o apantallando la antena recibidora de señal GPS. Debido a que la señal GPS es muy débil, puede ser fácilmente interferida por la transmisión de una señal en el rango de frecuencia adecuado. Existen dispositivos, inhibidores de frecuencia, capaces de cortar la señal GPS. La mayoría de estos dispositivos tienen una efectividad muy reducida, en tono a cinco o 10 metros. Pero existen planes para construir dispositivos capaces de ser mucho más potentes y tener más distancia. Las interferencias de la señal GPS afecta a los receptores individuales GPS y no a un área extensa.

Igual que se pueden producir interferencias, las señales GPS también tienen un desfase. La implementación inicial del sistema GPS tenía un factor de error aleatorio de hasta 100 metros. La suplantación del GPS se realiza de manera similar a la interferencia, salvo que en vez de utilizar una señal de interferencia se envía una señal de GPS falsa. Además, el sistema de GPS estará siempre disponible a disposición de los usuarios civiles salvo en caso de emergencias nacionales.

Por último, comentaremos las principales distribuciones de tiempos para áreas extensas. Con la disponibilidad comercial del GPS, el tiempo de alta precisión está ampliamente disponible. En la actualidad las fuentes de tiempo GPS tienen un precio menor y su precisión ha aumentado. Los relojes GPS son muy utilizados hoy en día en ámbitos como la protección, monitorización y en los dispositivos de control. La evolución de estas fuentes de tiempo en el sistema de potencia ha mejorado el proceso de análisis de evento, esta evolución ha sido tal que ha cambiado el papel del GPS hasta llegar a ser una pieza clave. Para tener una alta fiabilidad, como en los dispositivos de las subestaciones, se ha optado por la redundancia. Los sistemas de protección importantes suelen tener componentes primarios y de reserva. Existen diferentes posibilidades de distribución de las antenas y relojes GPS para conseguir esta fiabilidad.

Usar antenas de GPS redundantes, como se muestra en la ilustración 93, es un método para evitar que exista un único punto de fallo para la señal de tiempo. Esto requiere hardware adicional, para seleccionar los dispositivos fuentes de tiempo y proporcionar la distribución de las señales de tiempo. Este método proporciona relojes redundantes, pero aun así existe un único punto de fallo en el selector de fuente y en los dispositivos de distribución. Una solución que podría proporcionar más fiabilidad, sería que los relojes GPS pudieran aceptar señales de tiempo con gran precisión de cada uno de los relojes, de manera que cada reloj utiliza su propia señal interna y selecciona la señal desde el otro reloj, proporcionada por la otra antena. Esto se muestra en la figura 94.

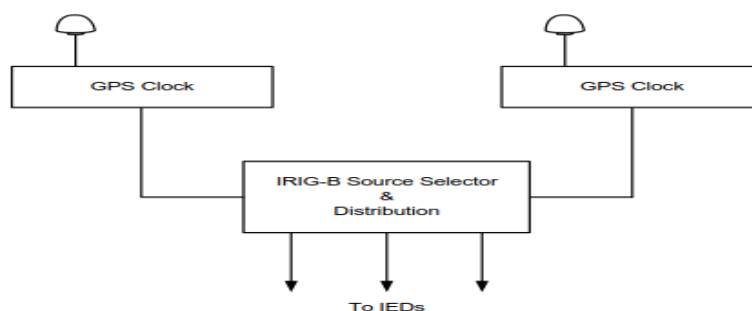


Ilustración 93: Método de distribución de tiempos mediante antenas redundantes

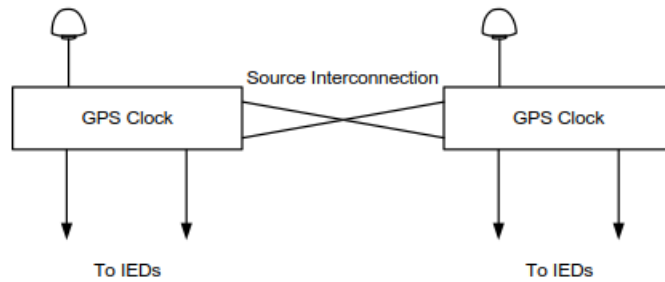


Ilustración 94: Método de distribución de tiempos redundante a partir de relojes GPS

Los métodos que aparecen en las figuras 77 y 77 proporcionan redundancia de hardware por todo el sistema, desde la antena hasta los IEDs. Pero en caso de un fallo catastrófico, como por ejemplo un fallo en el suministro de corriente, los IEDs que reciben la información del tiempo desde los relojes perderán su fuente de tiempo.

Los relojes que apoyan el ESTÁNDAR IEEE 1588 tendrán más opciones para alternar las fuentes de tiempo. Este estándar define un método para proporcionar tiempo de gran precisión sobre una red Ethernet, con este tipo de distribución, la señal de tiempo redundante puede ser proporcionan en una subestación adyacente, tal y como se muestra en la ilustración 95:

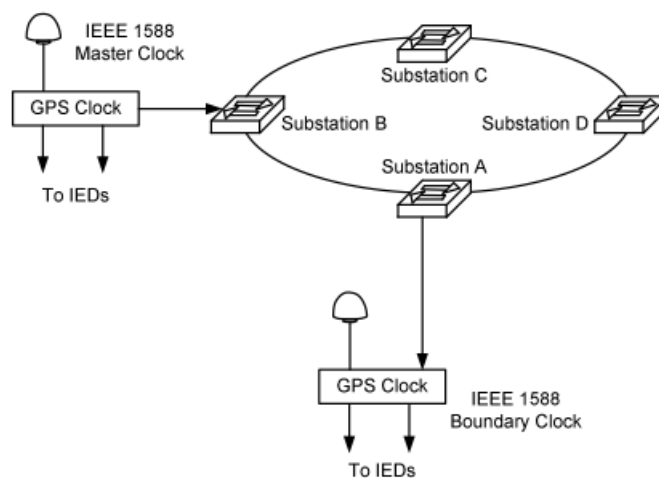


Ilustración 95: Método de distribución de tiempos a través de una subestación adyacente

Todos los sistemas descritos pueden distribuir tiempo con una precisión de decenas de nanosegundos. Pero hoy en día, la mejor manera de entregar tiempo con una precisión de nanosegundos sobre áreas extensas es un sistema multiplexor de división de tiempo que hace referencia a un reloj GPS capaz de utilizar ambas constelaciones de satélites, la estadounidense (GPS) y la rusa (GLONASS). En este sistema todos los nodos del sistema de comunicaciones están sincronizados en una misma referencia dentro de un microsegundo. Esta referencia debe ser una fuente de tiempo absoluto, como un reloj GPS.

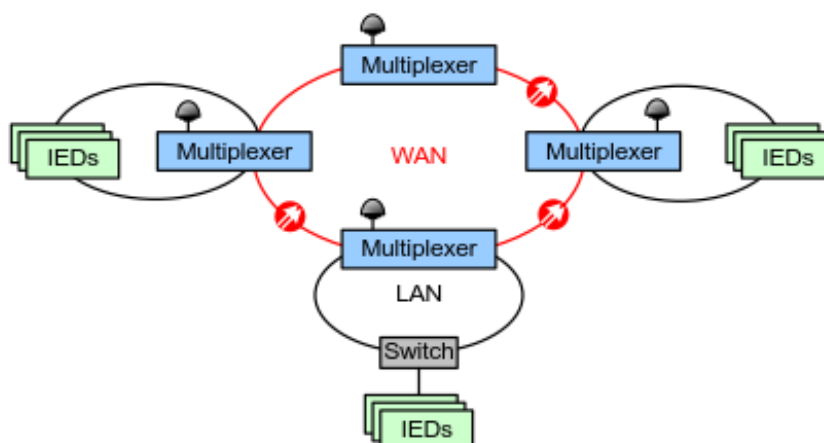


Ilustración 96: Método de distribución de tiempos a través de un sistema multiplexor de división de tiempos

La presencia de tiempos de gran precisión se ha convertido en un requisito indispensable para los sistemas de potencia. Podemos afirmar que la red de satélite GPS puede proporcionar tiempos de gran precisión y con una alta fiabilidad para áreas extensas utilizando cualquiera de los sistemas descritos.

ANEXO II: DISPOSICIÓN DE LOS CONDUCTORES

En este anexo se va a ampliar la información acerca del modelo de línea elegido para la simulación, además se mostrará tanto el número de conductores por fase como la disposición de estos conductores. Como ya se ha explicado anteriormente, se ha elegido el modelo de línea Jmartí para la simulación de la línea. Este es un modelo de parámetros distribuidos que se comporta de manera adecuada para el desarrollo de ecuaciones en el ámbito de la frecuencia.

La línea en la cual se va a realizar el estudio, va a tener tres conductores desnudos por fase y dos cables de guarda. La distancia total de línea es de 80 km con tres transposiciones de fases, en el kilómetro 20,40 y 60. La estructura de las torres en las que se apoya la línea está representada en la ilustración X. La altura de la torre va a ser de 24 metros, con una distancia entre los conductores de fase y el suelo de 18 metros. Por otro lado, la distancia entre los conductores de guarda y el suelo es de 32 metros. Como se ha explicado anteriormente, existen tres conductores por fase separados entre ellos con un ángulo de 45° y una distancia de 11.25 centímetros. A continuación, en las diferentes ilustraciones podemos observar tanto la disposición de la torre como los detalles de los conductores:

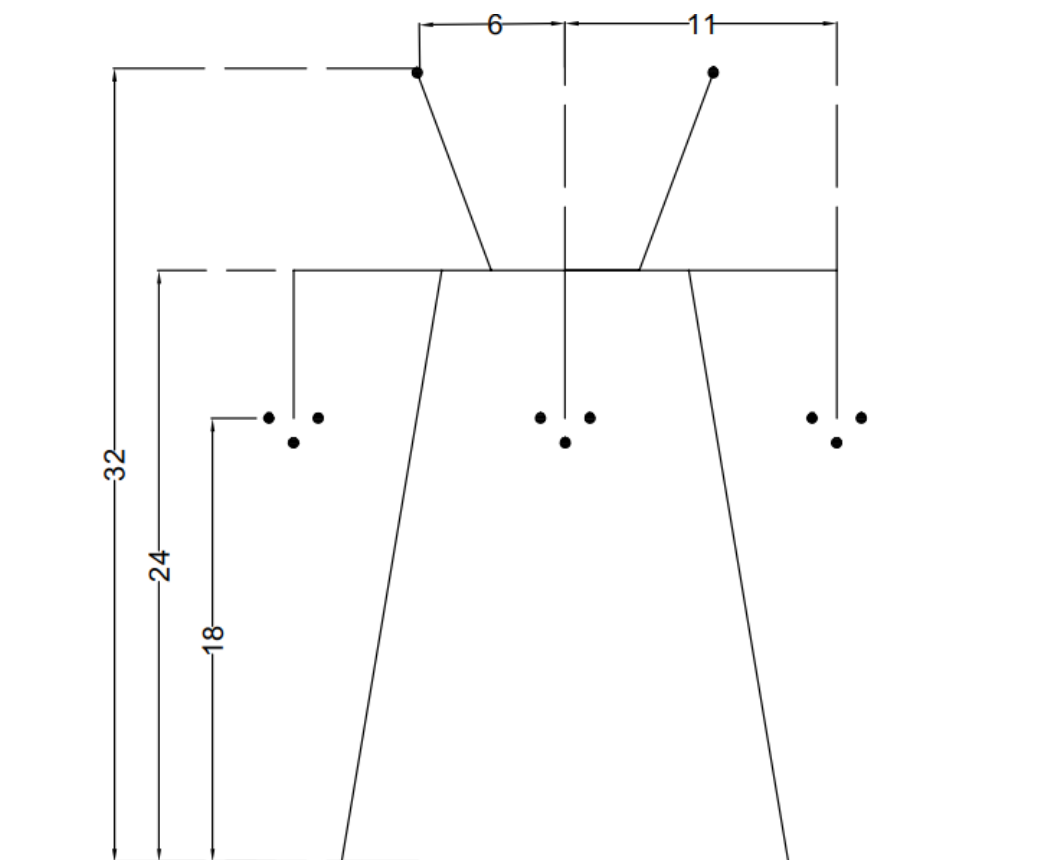


Ilustración 97: Torre de alta tensión de la línea a estudiar

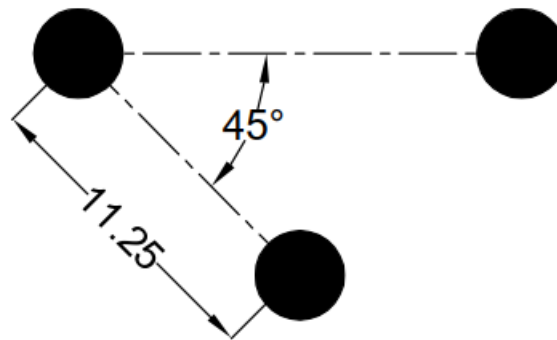


Ilustración 98: Detalle de la distribución de los conductores en una fase

El tipo de cable elegido para los conductores aéreos es el “CARDINAL”, el cual está compuesto tanto de aluminio como de acero. En la siguiente tabla, extraída de la referencia [32] según Norma UNE 21 018. Acero calidad A, podemos observar sus principales características:

Características CARDINAL (485-AL1/63-ST1A LA545)	
Sección de aluminio [mm ²]	484.5
Sección de acero [mm ²]	62.8
Sección de total [mm ²]	547.3
Diámetro alma [mm]	10.14
Diámetro total [mm]	30.42
Nº de alambres de aluminio	54
Diámetro de los alambres de aluminio [mm]	3.38
Nº de alambres de acero	7
Diámetro de los alambres de acero [mm]	3.38
Carga [N]	152243
Peso [Kg/km]	1826
Resistencia eléctrica a 20º [Ω]	0.0596

En la siguiente ilustración podemos observar la sección que va a tener los conductores de fase de nuestra línea:

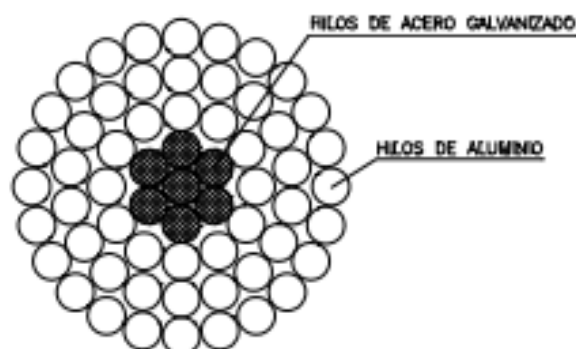


Ilustración 99: Sección del cable tipo CARDINAL

Para los conductores de guarda únicamente habrá un cable por conductor y se ha elegido un cable tipo "OPGW 52F.O". Este tipo de cable está compuesto por fibra óptica y está normalizado según la norma UNE-EN-187102:97. Las características principales de este cable son las siguientes:

Características CARDINAL (485-AL1/63-ST1A LA545)	
Diámetro alma [mm]	5
Diámetro total [mm]	15.20
Carga [N]	71050
Peso [Kg/km]	566
Resistencia eléctrica a 20º [Ω]	0.38

En la siguiente ilustración podemos observar la sección de un cable de este tipo, pudiendo observar los diferentes componentes y su ubicación.

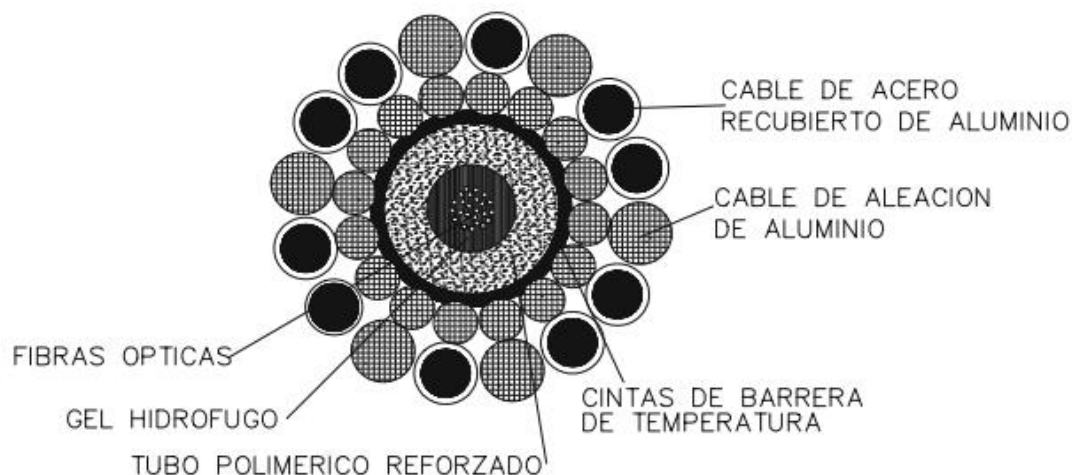


Ilustración 100: Sección de un cable tipo "OPGW 52F.O"

Todas estas dimensiones deben de ser introducidas en el software de cálculo de transitorios ATP-EMTP. Para ello basta con rellenar la pestaña de Data. En este apartado la columna *Ph.no* indica el número de la fase, apareciendo un 0 para los cables de guarda; las columnas *Rin* y *Rout* hacen referencia al radio del conductor interior y exterior, respectivamente; el apartado *Resis* alude a la resistencia del conductor en ohm/ unidad de longitud. En el entorno de distancias, todas medidas en metros, el grupo *Horiz* se refiere a la distancia horizontal desde el centro del haz de conductores hasta una línea de referencia seleccionada situada en el haz de conductores de la siguiente fase; el parámetro *Vtower* alude a la altura del haz de conductores en la torre medida desde el suelo; por último, la columna *Vmid* indica un parametro que considera la flecha del vano medio, la altura del conductor se calcula desde la ecuación:

$$h = \frac{2}{3}V_{mid} + \frac{1}{3}V_{tower}$$

Por último, se va procede a introducir la distancia de separación entre conductores, en centímetros, y el ángulo, en grados sexagesimales, entre estos en cada una de las fases, en la columna *Separ* y en *Aplha* respectivamente. El último parámetro que se puede observar hace referencia al número de conductores que hay por cada una de las fases correspondientes o cables de guarda.

En la siguiente ilustración se puede observar el resultado una vez introducido los datos:

#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.55	1.502	0.0571	-11	24	15	11.25	45	3
2	2	0.55	1.502	0.0571	0	24	15	11.25	45	3
3	3	0.55	1.502	0.0571	11	24	15	11.25	45	3
4	0	0.5	0.751	0.38	-6	32	20	0	0	1
5	0	0.5	0.751	0.38	6	32	20	0	0	1

Ilustración 101: Pestaña de dimensionamiento de la línea en ATPDraw

ANEXO II: CÓDIGO DE MATLAB

A continuación, se expondrá el código utilizado en Matlab para estimar el tiempo de llegada de la onda viajera al extremo de la línea. Únicamente se mostrará el código para la localización de falta por onda viajera mediante la corriente de un único extremo, ya que para la localización mediante las corrientes de ambos extremos únicamente es necesario repetir el código con las muestras de corriente recogidas en el extremo opuesto.

```
clc
clear all
close all

load ('Corriente.mat'); % Cargo las corrientes del extremo A obtenidas
mediante el ATP
%%
iX2aX1a = iAaX1a (29986:31987); % Selecciono la parte necesaria de los
datos de corriente
iX2bX1b = iAbX1b (29986:31987);
iX2cX1c = iAcX1c (29986:31987);

%%
IA= rot90 (iX2aX1a);
IB= rot90 (iX2bX1b);
IC= rot90 (iX2cX1c);

% Matriz de transformación a componentes aéreas y terrestres

Tc_inv = 1/3*([1 1 1
               2 -1 -1
               0 sqrt(3) sqrt(3)]);

IM = Tc_inv*[IA
             IB
             IC];

ig = IM (1,:); %Corriente de modo tierra
ia1 = IM (2,:); % Corriente modo aéreo 1
ia2 = IM (3,:); % Corriente modo aéreo 2

% Descomposición por wavelet de las señales de modo aéreo

[c,l] = wavedec(ia1,4,'db2');
cA4=appcoef(c,l,'db2',4);
[cD1,cD2,cD3,cD4]=detcoef(c,l,[1,2,3,4]);
A3= wrcoef('a',c,l,'db2',4);
D1 = wrcoef('d',c,l,'db2',1);
D2 = wrcoef('d',c,l,'db2',2);
D3 = wrcoef('d',c,l,'db2',3);
D4 = wrcoef('d',c,l,'db2',4);
```

```

% Descomposición por wavelet de las señales de modo a tierra

[C,L] = wavedec(ig,4,'db2');
CA4=appcoef(C,L,'db2',4);
[CD1,CD2,CD3,CD4]=detcoef(C,L,[1,2,3,4]);
a3= wrcoef('a',C,L,'db2',3);
d1 = wrcoef('d',C,L,'db2',1);
d2 = wrcoef('d',C,L,'db2',2);
d3 = wrcoef('d',C,L,'db2',3);
d4 = wrcoef('d',C,L,'db2',4);

% Plot de la señal original

subplot(3,2,[1 2]), plot(ia1)
hold on;
plot (ig,'r')
title(' Señales originales');
legend('Modo aereo', 'Modo a tierra','Location','NorthEastOutside')
axis ( [0 2000 0 4000] );

%%
% Plot del cuarto detalle de la wavelet

subplot(3,2,3), plot(D4)
hold on;
plot(d4,'r')
title(' Nivel 4 de los coeficientes de detalle');
ylabel('d4');
axis ( [0 2000 -300 300] );
%%

% Plot del tercer detalle de la wavelet

subplot(3,2,4), plot(D3)
hold on;
plot(d3,'r')
title(' Nivel 3 de los coeficientes de detalle');
ylabel('d3');
axis ( [0 2000 -300 300] );
%%

% Plot del segundo detalle de la wavelet

subplot(3,2,5), plot(D2)
hold on;
plot(d2,'r')
title(' Nivel 2 de los coeficientes de detalle');
ylabel('d2');
axis ( [0 2000 -300 300] );
%%

% Plot del primer detalle de la wavelet

subplot(3,2,6), plot(D1)
hold on;
plot(d1,'r')
title(' Nivel 1 de los coeficientes de detalle');

```

```
ylabel('d1');  
axis ( [0 2000 -300 300] );
```